



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN PARA LA
REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO
DERIVADA DE SEMILLAS DE *DATURA STRANOMIUM*”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: JHOE ALEXANDER ESPINOZA BARRIONUEVO

DIRECTORA: Ing. Mayra Paola Zambrano Vinueza

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, **Jhoe Alexander Espinoza Barrionuevo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jhoe Alexander Espinoza Barrionuevo declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, 18 de octubre de 2021

**JHOE ALEXANDER
ESPINOZA**

Firmado digitalmente por JHOE ALEXANDER ESPINOZA
Nombre de reconocimiento (DN): cn=JHOE ALEXANDER
ESPINOZA, serialNumber=0603504994, ou=AUTORIDAD
DE CERTIFICACION ESPOCH DTIC, o=ESPOCH DTIC,
I=RIOBAMBA, c=EC
Fecha: 2021.10.25 14:39:44 -05'00'

Jhoe Alexander Espinoza Barrionuevo




060350499-4

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El tribunal de Trabajo de titulación certifica que: el presente trabajo técnico de “**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO DERIVADA DE SEMILLAS DE *DATURA STRANOMIUM***” de responsabilidad del señor Jhoe Alexander Espinoza Barrionuevo ha sido revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Jorge Efrén Silva Yumi, PhD, PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: JORGE EFREN SILVA YUMI	2021-08-23
Mayra Paola Zambrano Vinueza, Mgs. DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: MAYRA PAOLA ZAMBRANO VINUEZA	2021-08-23
Sandra Fabiola Heredia Moyano, Ing. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: SANDRA FABIOLA HEREDIA MOYANO	2021-08-23

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres Emma y Patricio, mi hermana Ginger y mis abuelitos quienes han sido mi inspiración y fortaleza para poder seguir en este proceso de aprendizaje, desarrollo académico y crecimiento personal.

Jhoe

AGRADECIMIENTO

Primeramente dar gracias a Dios por darme las fuerzas de seguir adelante, brindarme salud y nunca haberme abandonado en los momentos difíciles, y permitirme terminar esta etapa profesional, a mis padres Emma Janett y Armando Patricio, por su apoyo y consejos que me brindan día a día, a mi hermana Ginger con quien he compartido mi vida, por su confianza y lealtad por lo cual es parte fundamental en mi vida, a mi novia Karen por ser una gran persona y pareja, por sus consejos llenos de sabiduría, su gran apoyo y aliento en los momentos necesarios.

Al Grupo de Investigación de Materiales Avanzados (GIMA), a su director: Doctor, Jorge Efrén Silva Yumi por ser una persona que me brindó su amistad y confianza dentro del grupo para llevar a cabo el presente trabajo.

A mi Directora de trabajo de titulación la Ing. Mayra Zambrano como también a la Ing. Sandra Heredia, quienes, además de ser personas de gran calidad humana han sido también personas que han sabido guiarme por el camino de la excelencia, además de ser un apoyo y soporte al momento de realizar el presente trabajo.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos por los momentos compartidos en el transcurso de la preparación académica y por el apoyo demostrado.

Jhoe

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I	
1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	1
1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.1.1 <i>Obtención de carbón activado</i>	<i>1</i>
1.2 Identificación del Problema	2
1.3 Justificación del proyecto.....	2
1.4 Beneficiarios directos e indirectos	3
1.4.1 Beneficiarios directos	3
1.4.2 Beneficiarios indirectos	4
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	<i>4</i>
1.5.2 <i>Objetivo específicos</i>	<i>4</i>
1.6 Localización geográfica del proyecto.....	4
CAPÍTULO II	
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5

2.1	Adsorción	5
2.1.1	<i>Tipos de adsorción</i>	6
2.1.1.1	<i>Adsorción física</i>	6
2.1.1.2	<i>Adsorción química</i>	6
2.1.2	Equilibrio de Adsorción	6
2.1.3	Isotermas de Adsorción	7
2.1.3.1	<i>Isotermas de Adsorción Langmuir</i>	7
2.1.3.2	<i>Isoterma de Adsorción Freundlich</i>	9
2.1.3.3	<i>Isoterma de Adsorción Lineal</i>	11
2.1.4	<i>Cinética de Adsorción</i>	12
2.1.5	<i>Carbón Activado</i>	13
2.1.5.1	<i>Estructura y propiedades del carbón activado</i>	13
2.1.5.2	<i>Especificaciones de calidad del carbón activado</i>	14
2.1.6	<i>Cromo</i>	17
2.1.6.1	<i>El cromo en el medio ambiente</i>	18
2.1.6.2	<i>El cromo y la salud</i>	19
 CAPÍTULO III		
3	MARCO METODOLÓGICO	20
3.1	Planificación	20
3.1.1	<i>Tipo de proyecto</i>	20
3.2	Materiales, Reactivos y Equipos	20
3.2.1	<i>Muestra</i>	20
3.2.2	<i>Materiales</i>	20
3.2.3	<i>Reactivos</i>	20
3.2.4	<i>Equipos</i>	21

3.3	Metodología	21
3.3.1	Caracterización de la muestra (semillas de datura)	21
3.3.1.1	<i>Determinación de humedad.</i>	21
3.3.1.2	<i>Determinación de materia volátil</i>	21
3.3.1.3	<i>Determinación de cenizas</i>	22
3.3.1.4	<i>Determinación de carbón fijo</i>	22
3.3.2	Preparación del carbón activado	23
3.3.2.1	<i>Carbonización</i>	23
3.3.2.2	<i>Impregnación y Activación</i>	23
3.3.2.3	<i>Lavado y secado</i>	23
3.4	Caracterización del Carbón activado	23
3.4.1	Porcentaje de humedad	23
3.4.2	Porcentaje de ceniza	24
3.4.3	Densidad aparente	24
3.4.4	Densidad real	24
3.4.5	Porcentaje de porosidad	24
3.4.6	pH	24
3.5	Ensayo de Adsorción de Cromo	25
3.5.1	Determinación de la concentración de Cr	25
3.5.2	Diseño experimental	25
3.5.3	Determinación de la isoterma de adsorción	26
3.6	Diseño de la columna de adsorción.	27
3.6.1	Zona de transferencia de masa	27
3.6.2	Desarrollo de las Isotermas de Adsorción.	28
3.6.2.1	Isoterma de Langmuir	28

3.6.2.2	<i>Isoterma de Freundlich</i>	29
3.6.2.3	<i>Adsorción en Batch</i>	29
3.6.2.4	<i>Adsorción en continuo</i>	30
3.6.2.5	<i>Contactores de Adsorción</i>	31
3.7	Dimensionamiento y Cálculos del sistema de columnas	32
3.7.1	<i>Condiciones de operación</i>	32
3.7.2	<i>Dimensionamiento de lecho de carbón activado</i>	33
3.7.3	<i>Caídas de presión</i>	35
3.7.4	<i>Cálculo de pérdidas por fricción</i>	36
3.7.5	<i>Cálculos de caída de presión por accesorios</i>	38
3.7.6	<i>Cálculos de caídas de presión por el lecho de la columna</i>	39
3.7.7	<i>Caída de presión total del sistema</i>	40
3.7.8	<i>Potencia de Bombeo</i>	41

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	42
4.1	Caracterización de la muestra (semillas de datura)	42
4.2	Caracterización del carbón activado	42
4.3	Resultados espectros FT-IR	43
4.3.1	<i>Espectro del carbón obtenido a partir de las semillas de datura stramonium</i>	43
4.3.2	<i>Espectro del carbón activado</i>	44
4.4	Adsorción de cromo con carbón activado	45
4.4.1	<i>Análisis del diseño Experimental</i>	45
4.4.2	<i>Determinación de las isotermas de adsorción</i>	46
4.4.2.1	<i>Isoterma Lineal</i>	47
4.4.2.2	<i>Isoterma de Freundlich</i>	49

4.4.2.3 <i>Isoterma de Langmuir</i>	51
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	55
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Condiciones Meteorológicas del cantón Riobamba	4
Tabla 1-2:	Tipos de isothermas según el valor del factor de separación RL	9
Tabla 2-2:	Características del cromo en el uso industrial	18
Tabla 1-3:	Modelo del diseño experimental de acuerdo a las variables independientes.....	25
Tabla 2-3:	Modelo de la matriz para la isoterma de adsorción	26
Tabla 3-3:	Parámetros Langmuir estimados para adsorción de cromo	33
Tabla 4-3:	Resultado del diseño de columnas y lecho de adsorción de cromo	35
Tabla 5-3:	Propiedades del fluido	35
Tabla 6-3:	Características del tanque de almacenamiento	36
Tabla 7-3:	Características adicionales del tanque de almacenamiento	36
Tabla 8-3:	Parámetros de operación.....	36
Tabla 9-3:	Características de la tubería.....	36
Tabla 10-3:	Condiciones de flujo en tuberías	37
Tabla 11-3:	Factor de fricción.....	37
Tabla 12-3:	Pérdidas por fricción en Tuberías	38
Tabla 13-3:	Pérdidas por fricción totales en Tuberías	38
Tabla 14-3:	Pérdidas por accesorios en la Tubería 1	38
Tabla 15-3:	Pérdidas totales por accesorios Tubería 1.....	39
Tabla 16-3:	Pérdidas por accesorios en la Tubería 2	39

Tabla 17-3:	Pérdidas totales por accesorios Tubería 2.....	39
Tabla 18-3:	Características de la columna de carbón activado	39
Tabla 19-3:	Propiedades del carbón activado	40
Tabla 20-3:	Caída de presión en el lecho de Carbón Activado.....	40
Tabla 21-3:	Pérdidas y caídas de presión totales del sistema.....	41
Tabla 1-4:	Resultados de la caracterización de la muestra (semillas de datura)	41
Tabla 2-4:	Resultados del carbón activado derivadas de las semillas de datura stranomium	42
Tabla 3-4:	Wavernumber vs %T Carbón de semillas de datura stranomium	44
Tabla 4-4:	Wavernumber vs %T Carbón activado obtenido	45
Tabla 5-4:	Resultados diseño experimental de acuerdo a las variables independientes R1	45
Tabla 6-4:	Resultados diseño experimental de acuerdo a las variables independientes R2....	46
Tabla 7-4:	Datos de curva de calibración.....	46
Tabla 8-4:	Resultados de la matriz de isoterma Lineal	47
Tabla 9-4:	Resultados de regresión de la isoterma Lineal	47
Tabla 10-4:	Análisis de varianza de la isoterma Lineal	48
Tabla 11-4:	Resultados de la matriz de isoterma de Freundlich	49
Tabla 12-4:	Resultados de regresión de la isoterma de Freundlich	49
Tabla 13-4:	Análisis de varianza de la isoterma de Freundlich	49
Tabla 14-4:	Resultados de la matriz de isoterma de Langmuir.....	51
Tabla 15-4:	Resultados de regresión de la isoterma de Langmuir	51
Tabla 16-4:	Análisis de varianza de la isoterma de Langmuir.....	51

Tabla 17-4: Determinación de la curva de ruptura.....	53
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Estructura porosa del carbón activado	5
Figura 2-2:	Tipos de isothermas según el valor del factor de separación RL	9
Figura 3-2:	Representación de curvas de Equilibrio.....	11
Figura 4-2:	Perfiles de concentración en el caso de difusión externa e interna	12
Figura 1-3:	Proceso de adsorción en lecho fijo.....	27
Figura 2-3:	Curva de ruptura típica para el carbón activado	30
Figura 3-3:	Configuración de contactores de carbón activado	31
Figura 4-3:	Tubería de Presión Plastigama.....	34
Figura 1-4:	Espectro IR del carbón derivada de las semillas de datura stranomium	43
Figura 2-4:	Espectro IR del carbón activado derivada de las semillas de datura stranomium	44
Figura 3-4:	Curva de calibración	47
Figura 4-4:	Isoterma de adsorción Lineal	48
Figura 5-4:	Isoterma linealizada del modelo de Freundlich	50
Figura 6-4:	Isoterma linealizada del modelo de Langmuir	52
Figura 7-4:	Obtención de la curva de ruptura	53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Diagrama de flujo del proceso de obtención del carbón activado	22
Gráfico 2-3:	Diagrama PFD del equipo diseñado	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2:	Carga del adsorbente.....	7
Ecuación 2-2:	Isoterma de Langmuir.....	8
Ecuación 3-2:	Representación de Stumm y Morgan.....	8
Ecuación 4-2:	Representación de Weber	8
Ecuación 5-2:	Factor RL.....	8
Ecuación 6-2:	Ecuación de Freundlich	10
Ecuación 7-2:	Ecuación Isoterma de Freundlich	10
Ecuación 8-2:	Isoterma de Adsorción Lineal.....	11
Ecuación 9-2:	% Volumen total de poro.....	14
Ecuación 10-2:	% Densidad aparente	14
Ecuación 11-2:	% Densidad real.....	15
Ecuación 12-2:	% Porosidad.....	15
Ecuación 13-2:	% Humedad	16
Ecuación 14-2:	% Materia volátil	16
Ecuación 15-2:	% Cenizas	16
Ecuación 16-2:	% Carbón fijo.....	17
Ecuación 1-3:	Isoterma de adsorción de Langmuir en base a la concentración.....	26
Ecuación 2-3:	Formula lineal de la Isoterma de Langmuir.....	28
Ecuación 3-3:	Derivada de la isoterma de Langmuir.....	28

Ecuación 4-3:	Formula lineal de la Isoterma de Freundlich	28
Ecuación 5-3:	Concentración del adsorbente en equilibrio.....	29
Ecuación 6-3:	Balance de masa del lecho de carbón activado.....	29
Ecuación 7-3:	Balance de masa del lecho	31
Ecuación 8-3:	Ratio del carbón activado	32
Ecuación 9-3:	Ratio del adsorbente	32
Ecuación 10-3:	Vida de contacto del adsorbente	32
Ecuación 11-3:	Tiempo de residencia.....	32
Ecuación 12-3:	Isoterma de Langmuir Tipo I.....	33
Ecuación 13-3:	Masa del carbón activado	34
Ecuación 14-3:	Volumen del lecho de carbón activado.....	34
Ecuación 15-3:	Área transversal de lecho.....	34
Ecuación 16-3:	Altura de lecho.....	35
Ecuación 17-3:	Número de Reynolds	36
Ecuación 18-3:	Área de flujo	37
Ecuación 19-3:	Velocidad de flujo.....	37
Ecuación 20-3:	Factor de fricción.....	37
Ecuación 21-3:	Pérdidas por fricción.....	37
Ecuación 22-3:	Pérdidas por fricción por accesorios.....	38
Ecuación 23-3:	Expresión de Ergun.....	40
Ecuación 24-3:	Pérdida de carga total.....	40

Ecuación 25-3: Caída de presión total	40
Ecuación 26-3: Potencia de Bombeo	41

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: OBTENCIÓN MATERIA PRIMA

ANEXO B: PROCESO DE CARBONIZACIÓN

ANEXO C: PROCESO DE ACTIVACIÓN QUÍMICA

ANEXO D: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y CARBÓN ACTIVADO

ANEXO E: ENSAYOS DE ADSORCIÓN

ANEXO F: FICHA TÉCNICA DEL SISTEMA DE TUBERÍAS.

ANEXO G: FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue diseñar una columna de adsorción de carbón activado a partir de las semillas de *datura stramonium* para la remoción de soluciones de cromo, iniciando el estudio con la selección y preparación de las semillas, seguido de la carbonización a 400°C durante 1 hora en una atmosfera inerte mediante un reactor térmico con un flujo de gas nitrógeno, y finalmente su posterior activación mediante la utilización de H₃PO₄ como agente impregnante. El carbón activado obtenido a partir de las semillas de *datura stramonium* fue sometido a pruebas en base a los requerimientos establecidos, además se realizaron ensayos de adsorción en la que se realizaron 9 pruebas, realizándose el estudio de los efectos de las variables independientes: pH (3, 4 y 5), dosis de carbón activado y tiempo de contacto, sobre la variable dependiente: capacidad de adsorción (mg Cr/g carbón activado). El diseño del equipo se realizó en base a dos columnas de lechos fijos de carbón activado obteniendo las respectivas isotermas de adsorción para la remoción de cromo, ajustando los resultados en base a los modelos matemáticos para el equilibrio, deduciendo así que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales, es la isoterma de Langmuir con un coeficiente de correlación R² de 0,9807, además se evaluó el sistema en base a una curva de ruptura mostrándose, que a los 120 minutos de operación, la prueba alcanza un 0,998 de la concentración inicial. Finalmente el trabajo realizado determinó que la adsorción de cromo con carbón activado a partir de las semillas de datura fue de 0,64 mg Cr/g, la cual es baja a comparación de carbones activados comerciales.

Palabras clave: <ADSORCIÓN>, <SEMILLAS (*Datura stramonium*)>, <CARBÓN ACTIVADO>, <ISOTERMAS DE ADSORCIÓN>, <CURVA DE RUPTURA>



Firmado electrónicamente por:
JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS



14-07-2021

1377-DBRAI-UTP-2021

ABSTRACT

The objective of this work was to design an activated carbon adsorption column from datura stramonium seeds for the removal of chromium solutions. The study began with the selection and preparation of the seeds, after carbonization at 400 ° C for 1 hour in an inert atmosphere by means of a thermal reactor with a flow of nitrogen gas, and finally their subsequent activation by using H₃PO₄ as impregnating agent. The activated charcoal obtained from the seeds of datura stramonium was subjected to tests based on the established requirements. In addition, adsorption tests were carried out in which 9 tests were carried out, carrying out the study of the effects of the independent variables: pH (3, 4 and 5), activated carbon dose and contact time, on the dependent variable: adsorption capacity (mg Cr / g activated carbon). The design of the equipment was made based on two columns of fixed beds of activated carbon obtaining the respective adsorption isotherms for the removal of chromium, adjusting the results based on the mathematical models for equilibrium, inferring that the model that best fits the experimental data is the Langmuir isotherm with a correlation coefficient R² of 0.9807, in addition, the system was evaluated based on a rupture curve showing that at 120 minutes of operation the test reaches 0.998 of the initial concentration. Finally, the work determined that the adsorption of chromium with activated carbon from the datura seeds was 0.64 mg Cr / g, which is low compared to commercial activated carbons.

Keywords: <ADSORPTION>, <SEEDS (Datura stramonium)>, <ACTIVATED CHARCOAL>, <ISOTHERMALS OF ADSORPTION>, <RUPTURE CURVE>

CAPÍTULO I

1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes de la investigación

1.1.1 Obtención de carbón activado

Según (Carrasco Tito y Londa Veletanga, 2018), obtuvieron carbón activado a partir de cáscara de coco que mediante una activación química con ácido fosfórico, este carbón activado con 40% de ácido fosfórico presentó muy buenas propiedades fisicoquímicas como son: área superficial e índice de yodo mismos que se establecen de acuerdo a sus normas respectivamente, además de poseer una gran capacidad de adsorción comparada con el carbón activado al 85%, posteriormente realizaron la aplicación en la adsorción de cloro del agua potable en cada uno de los carbones activados obtenidos, donde el carbón activado con 40% adsorbió el cloro con mucha facilidad con lo cual resultó que a mayor cantidad de carbón activado mayor cantidad de adsorción presenta, por ultimo concluye que el mejor proceso de activación química para obtener un carbón activo que cumpla con los requerimientos establecidos fue el carbón activado con ácido fosfórico.

(Tovar, 2016), realizó una comparación entre la utilización de carbón activado solo y carbón activado recubierto con polisulfuro de sodio alifático en la remoción de metales como lo es en este caso el cadmio y plomo, se obtuvo una mayor retención de cadmio en el carbón activado solo, mientras que el plomo reportó una mayor concentración y una buena retención usando el carbón activado solo y recubierto. Concluyendo así que el carbón activado recubierto con el polímero de azufre es favorable en la retención de metales y que si se lo aplica a una gran escala podría facilitar en su manipulación a comparación al carbón activado solo.

(Rincón-Silva et al., 2013), sintetizó carbón activado a partir de cáscara de semillas de eucalipto, mediante el método de activación química empleando como agente ácido fosfórico a dos concentraciones diferentes: 30 y 80 % v/v. Los carbones fueron caracterizados texturalmente mediante fisorción de N₂, posteriormente evaluaron la capacidad de adsorción de los sólidos con fenol desde solución acuosa, donde se evidenció gran capacidad de adsorción de los dos carbones debido a las amplias áreas superficiales, volúmenes de microporo y la química superficial de los sólidos.

Por último, (Juares, 2017) propuso un modelo caracterizando experimentalmente y modelando una columna empacada de carbón activado granular, en el cual simulando obtienen datos de equilibrio y una cinética para emplear modelos matemáticos y cinéticos óptimos.

1.2 Identificación del Problema

El país tiene una realidad en lo que respecta al manejo de aguas residuales, ya que “aproximadamente un 12% realiza un tratamiento dejando un gran 88% sin tratamiento el cual afecta directamente a la contaminación por el vertimiento de aguas servidas, la basura y productos químicos utilizados en empresas industriales, siendo esta no apta para consumo humano” (Torske, 2019).

Uno de los metales presentes en las aguas residuales es el cromo, “un elemento que ha sido identificado tanto como un micronutriente esencial, como una agente carcinogénico, dependiendo de su forma química” (Castiblanco Moreno y Perilla Perez, 2019, p. 6), y esto al momento de ser vertido de forma incontrolada al no contar con un sistema recolector que posibilite la separación de los efluentes urbanos e industriales es un elemento perjudicial.

“El tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados se desarrolla con tecnologías como precipitación, intercambio iónico y ósmosis inversa, sin embargo, presentan varias desventajas debido a sus altos costos en el consumo de energía, productos químicos. Por lo tanto el carbón activado es una gran alternativa, ya que posee una amplia área superficial para absorber diversas especies moleculares, además de ser un material versátil al que puede modificarse su estructura superficial para mejorar la remoción de algún determinado compuesto” (Pérez y Ventura, 2019, p. xix).

1.3 Justificación del proyecto

“El cromo en el medio ambiente puede acumularse por causas naturales o antropogénicas, la contaminación por cromo (VI) representa un grave peligro para la salud en la ingestión mediante agua potable generando tumores estomacales” (Murgueitio, Pinto y Landivar, 2015, p. 161). Existen varios tratamientos tanto primario como secundarios que ayudan pero que poseen rendimientos bajos que incrementa su costo de aplicación, no obstante se han desarrollado procesos tecnológicos específicos para eliminar metales pesados de aguas residuales, pero su aplicación es altamente costosa y están muy poco generalizados” (Murgueitio, Pinto y Landivar, 2015, p. 161).

“Como resultado de la reducción la especie Cr (VI), se transforma en Cr (III) el cual al pH de las aguas naturales precipita como hidróxido, Cr (OH)³ que se suspende en las aguas, pero si el pH es menor a 5 el ión Cr (III) no precipita sino que se mantiene en solución, esto debido a su capacidad de oxidación” (Fonseca y Giraldo, 2015, p. 32).

Es por ello que se presenta como alternativa viable el uso de carbón activado como tratamiento y adsorción de metales pesados. “El carbón activado es un material de carbón que se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución.” (Sabio y Reinoso, 1998, p. 163).

“La adsorción se define como una concentración creciente de un compuesto específico en la superficie de la interfaz de las dos fases. Estos compuestos específicos se transportan de una fase a otra y luego se adhieren a la superficie. Se considera un fenómeno complejo y depende principalmente de la química de la superficie o la naturaleza del sorbente, el sorbato y las condiciones del sistema entre las dos fases” (Patel, 2019, p. 1). La adsorción es un proceso económico y eficiente en el tratamiento de aguas residuales, por ello su alto uso en la eliminación de solutos y productos químicos que afectan al medio ambiente ” (Patel, 2019, p. 1).

En el diseño de un sistema de adsorción en carbón activado para la eliminación de cromo hexavalente, se propone caracterizando experimentalmente y modelando una columna de dos lechos fijos empacada de carbón activado granular, en el cual se obtiene un equilibrio y una cinética para emplear modelos matemáticos y cinéticos óptimos.

En base a lo descrito, el presente proyecto de titulación propone el “DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN A PARTIR DE CARBÓN ACTIVADO DERIVADA DE SEMILLAS DE *DATURA STRANOMIUM* PARA LA REMOCIÓN DE CROMO” con la finalidad de aplicarlo al tratamiento de aguas contaminadas, específicamente en la adsorción de cromo.

1.4 Beneficiarios directos e indirectos

1.4.1 Beneficiarios directos

El propósito del presente trabajo de integración curricular es beneficiar a los estudiantes y fortalecer académicamente su campo de estudio, principalmente a los estudiantes de la cátedra de Transferencia de masa de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de

Chimborazo, ya que dicho trabajo ayudará en la práctica referente al tratamiento de aguas contaminadas, además servirá como base en las futuras investigaciones del grupo de investigación de materiales avanzados “GIMA”.

1.4.2 Beneficiarios indirectos

El sector industrial se puede beneficiar debido a que la columna de adsorción que se diseñará se utilizaría buscando el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, lo que lo convierte en una alternativa para el desarrollo y cuidado del medio ambiente.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Diseñar una columna de adsorción a partir de carbón activado derivada de semillas de datura *stranomium* para remover cromo (III y VI).

1.5.2 Objetivo específicos

- Obtener el carbón activado derivado de las semillas de datura.
- Determinar si el carbón activado obtenido cumple con los requisitos en base a la norma NTE INEN 1991:1994 1995-10.
- Determinar la capacidad de la adsorción del carbón activado para remover cromo (III y VI) a diferentes concentraciones.
- Diseñar y evaluar la columna de adsorción a escala de laboratorio.

1.6 Localización geográfica del proyecto

El presente proyecto de Integración Curricular se desarrollará en la ciudad de Riobamba en el laboratorio de Operaciones Unitarias e Investigaciones dentro de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba en la Panamericana Sur Km 1 ½ con coordenadas 1°39'13.4''S 78°40'34.2''W, las condiciones a las que se desarrolló el proyecto se detallan en la tabla 1-1.

Tabla 1-1: Condiciones Meteorológicas del cantón Riobamba

Parámetros	Valores Promedio
Temperatura, °C	13,5
Presión, atm	1,01
Precipitación, mm/mes	820
Altitud, msnm	2750

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

CAPÍTULO II

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Adsorción

“La adsorción es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido. El proceso de sorción describe en realidad un grupo de procesos, que incluyen la adsorción y las reacciones de precipitación. Los flujos de residuos y carbón activado se han usado con frecuencia como un adsorbente, esta técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminante, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo del adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo” (Caviedes Rubio et al., 2015, p. 82).

“Este proceso ocurre en la región interfacial, en tres etapas consecutivas. En la primera etapa (difusión externa), el adsorbato se acerca a la superficie externa del sólido, venciendo la resistencia que se encuentra acumulada en una fina película límite alrededor del adsorbente. La superficie externa que expone el sólido es normalmente menor al 1 % del total existente (superficie externa e interna). En la segunda etapa, denominada de difusión interna, el adsorbato migra a través de la red porosa del sólido. Finalmente, en la última etapa, el adsorbato se adhiere a la superficie del adsorbente presentándose la adsorción propiamente dicha” (Barazorda y Condori, 2019, p. 7).

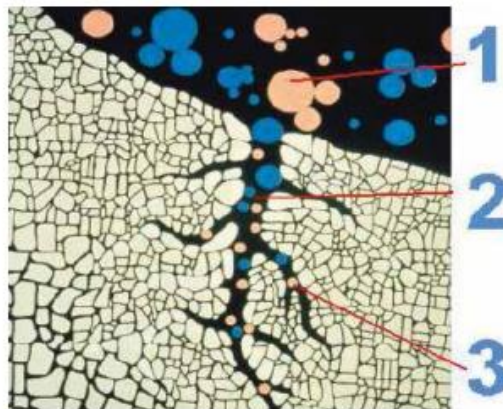


Figura 1-2: Estructura porosa del carbón activado

Fuente: (Barazorda y Condori, 2019, p. 7).

“El material sólido que proporciona la superficie para la adsorción se denomina adsorbente; Las especies que serán adsorbidas se denominan adsorbato. Al cambiar las propiedades de la fase líquida (por ejemplo concentración, temperatura, pH), las especies adsorbidas pueden liberarse de la superficie y transferirse de nuevo a la fase líquida. Puesto que la adsorción es un proceso superficial, el área superficial es un parámetro clave de adsorbentes” (Juares, 2017, p. 13).

2.1.1 Tipos de adsorción

De acuerdo a la naturaleza que puede presentarse en la atracción adsorbato-adsorbente “se producen principalmente dos tipos de adsorción, adsorción física (fisisorción) y adsorción química (quimisorción)” (Barazorda y Condori, 2019, p. 8).

2.1.1.1 Adsorción física

“La adsorción física se produce debido a las débiles fuerzas de atracción de Van der Waals. Esta sorción es reversible por naturaleza con valores de entalpía bajos, alrededor de 20 kJ / mol. Aquí, las fuerzas de atracción de desgaste están disponibles entre las moléculas adsorbidas y la superficie sólida de naturaleza débil. Por lo tanto, las moléculas adsorbidas se liberan para viajar sobre la superficie, ya que estas moléculas no se adhieren al lado de una partícula en la superficie adsorbente” (Patel, 2019, p. 1).

2.1.1.2 Adsorción química

La adsorción química por su parte es de naturaleza irreversible y posee una alta entalpía de sorción de 200 kJ/mol a diferencia de la sorción física. “Las fuerzas electrostáticas más fuertes, como los enlaces químicos covalentes o electrostáticos, juegan un papel vital en la atracción entre el sorbente y el sorbato” (Patel, 2019, p. 2).

“Por la naturaleza específica de las interacciones involucradas, la quimisorción sólo produce monocapas aunque en principio el crecimiento pudiera considerarse quimisorción en multicapas” (Barazorda y Condori, 2019, p. 9).

2.1.2 Equilibrio de Adsorción

“La adsorción es un fenómeno esencialmente bidimensional, es un medio para neutralizar o satisfacer las fuerzas de atracción que existen en una superficie o una interfase, en consecuencia la adsorción produce una disminución de la energía libre interfacial (o tensión si se trata de una interfase fluido/fluido)” (Barazorda y Condori, 2019, p. 14).

En cada estado de equilibrio de adsorción se define de forma única de acuerdo a variables de concentración de adsorbato en la fase líquida (C), la carga del adsorbente en la fase sólida (q) y la temperatura (T). La forma general de la expresión es:

$$q_{eq} = f(C_{eq}, T) \quad \text{Ecuación 1-2.}$$

Donde:

q_{eq} Será la carga del adsorbente en el equilibrio (g/g)

C_{eq} Será la concentración de solución en el equilibrio (g/m³)

T Será la temperatura

El equilibrio de adsorción se estudia mediante modelos matemáticos (isotermos de adsorción).

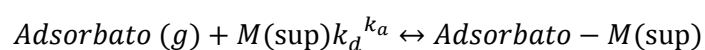
2.1.3 Isotermas de Adsorción

El modelo matemático se basa en las isotermas de adsorción que se define como “las representaciones gráficas de las curvas que relaciona la cantidad de soluto adsorbido frente a la concentración de adsorbato en la fase líquida y en la fase gaseosa” (Barazorda y Condori, 2019, p. 15).

2.1.3.1 Isotermas de Adsorción Langmuir

Una descripción clara acerca del modelo de adsorción es la siguiente definición descrita por (Barazorda y Condori, 2019, p. 16): “El modelo de adsorción Langmuir supone que la superficie es homogénea, tiene un número específico donde se puede adsorber una molécula, es decir cuando todos los sitios están ocupados no es posible que continúe la adsorción (el sistema se satura), el calor de adsorción es independiente del grado de recubrimiento y todos los sitios son equivalente y la energía de las moléculas adsorbidas es independiente de la presencia de otras moléculas”

Por otra parte se define la isoterma de Langmuir como una correspondencia a “una adsorción en monocapa, la cantidad absorbida aumenta con la presión hasta alcanzar un valor límite correspondiente al recubrimiento de la superficie por una monocapa. Es la isoterma característica de un proceso únicamente de quimisorción” (Barazorda y Condori, 2019, p. 16). El proceso dinámico de adsorción se plantea como:



Donde:

k_a Es la constante de velocidad para la adsorción y k_d es la constante de velocidad para la desorción.”

Por tanto la isoterma de Langmuir está dada por la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Ecuación 2-2.}$$

Donde q_e y C_e tienen el mismo significado que en la isoterma lineal, q_m es la máxima capacidad de adsorción y b es una constante que se relaciona con la energía de adsorción. Matemáticamente, la expresión se puede linealizar de dos formas:

De acuerdo con la representación de Stumm y Morgan:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m b C_e} \quad \text{Ecuación 3-2.}$$

Y de acuerdo con la representación de Weber:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{Ecuación 4-2.}$$

“Si la adsorción obedece la ecuación de Langmuir, q_m y b pueden evaluarse de las pendientes e interceptos de las gráficas C_e/q_e Vs. C_e (Forma II) o $1/q_e$ Vs. $1/C_e$ (Forma I)” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 26). No obstante se debe denotar que el modelamiento de los resultados experimentales de las isotermas de adsorción usando el modelo de Langmuir presenta diferencias notables cuando se usan las Formas I o II indistintamente. (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 26)

“Generalmente, se define un factor R_L que indica si la isoterma es favorable o no. En consecución de la constante b , el factor R_L está dado por la expresión:

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_o} \quad \text{Ecuación 5-2.}$$

El parámetro R_L indica la forma de la isoterma de acuerdo a la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Tipos de isothermas según el valor del factor de separación RL.

VALOR DE RL	TIPO DE ISOTERMA
$RL > 1$	Desfavorable
$RL = 1$	Ley de Henry
$RL = 0$	Irreversible
$0 < RL < 1$	Favorable

Fuente: (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 27)

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

En este caso si se obtiene una isoterma favorable, la transferencia de masa desde el seno de la fase líquida hacia el sólido será factible, lo cual indica que el adsorbente tiene una alta afinidad por el adsorbato” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 27).

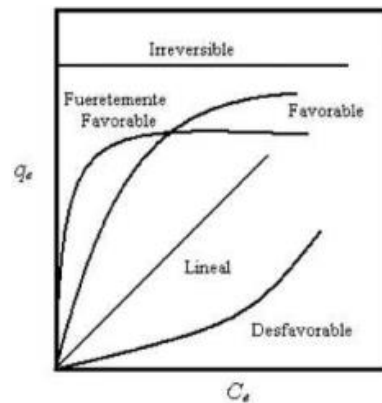


Figura 2-2 Tipos de isothermas según el valor de RL

Fuente: (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 27)

2.1.3.2 *Isoterma de Adsorción Freundlich*

“La isoterma de Freundlich asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. No existen interacciones lateral entre las moléculas adsorbidas (adsorbato), a diferencia del Langmuir esta adsorbe en multicapas” (Barazorda y Condori, 2019, p. 18).

“Esta isoterma de Freundlich puede obtenerse modificando las suposiciones de Langmuir para permitir diversos tipos de centros de adsorción en el sólido, cada uno de los cuales intervienen con un diferente calor de adsorción, la isoterma de Freundlich no es válida cuando la

concentración es muy elevada en adsorción de líquidos, pero suele ser más precisa que la isoterma de Langmuir para concentraciones intermedias” (Barazorda y Condori, 2019, p. 19).

La isoterma de Freundlich se define por:

$$W = bc^m \quad \text{Ecuación 6-2.}$$

W: Es la cantidad de ion metálico retenido por unidad de masa de adsorbente (mg/g).

c: Es la concentración de equilibrio de ion metálico en la fase líquida (mg/l).

b: Es el parámetro de la ecuación relacionada con la afinidad del adsorbente por los iones metálicos

m: Es el parámetro de la ecuación relacionada con la intensidad de adsorción, cuyo valor varía entre 0 y 1.

La anterior ecuación no puede definir el intervalo lineal en concentraciones muy bajas o el efecto de saturación a concentraciones muy altas, es por eso que se debe emplear en concentraciones intermedias (Barazorda y Condori, 2019, p. 19)..

La ecuación de esta isoterma se define como:

$$q_{eq} = K \cdot C_{eq}^n \quad \text{Ecuación 7-2.}$$

Siendo:

“*K*” el coeficiente de adsorción. Caracteriza la fuerza de adsorción, cuanto mayor es el valor de *K*, mayor es la carga adsorbente que se puede lograr.

“El parámetro “*n*” se encuentra relacionado con la heterogeneidad energética de la superficie adsorbente. Cuanto menor sea el valor de *n*, más cóncava es la forma isotérmica y si la *n*=1, la gráfica se vuelve lineal. Isotermas con un *n*<1 se consideran favorables, ya que muestran las altas cargas adsorbentes en concentraciones bajas. Si *n*>1 se considera desfavorable, ya que ocurriría al contrario” (Barazorda y Condori, 2019, p. 19).

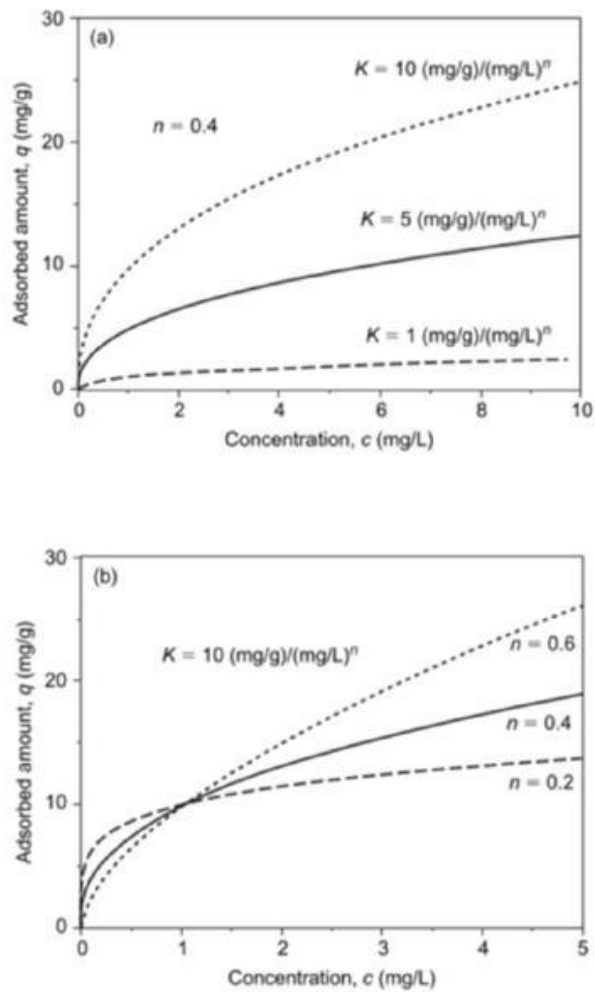


Figura 3-2 Representación de curvas de equilibrio

Fuente: (Juares, 2017, p. 22).

2.1.3.3 *Isoterma de Adsorción Lineal*

La isoterma Lineal viene representada por:

$$Y = KC_f \quad \text{Ecuación 8-2.}$$

Donde:

C_f : Es la concentración en equilibrio del ion metálico en la fase líquida (mg/L).

K : Es la constante de adsorción, coeficiente de distribución o de partición.

2.1.4 Cinética de Adsorción

La cinética de adsorción se describe de acuerdo a la distribución de equilibrio que existe entre el adsorbato y adsorbente estableciendo el tiempo de equilibrio y por ende su cinética (Barazorda y Condori, 2019, p. 20).

El proceso de adsorción puede determinarse en cuatro etapas, descritas a continuación:

1. El transporte del adsorbato pasa desde la fase líquida a la capa límite hidrodinámica localizada alrededor de la partícula adsorbente.
2. El transporte a través de la capa límite a la superficie externa del adsorbente, denominada difusión de película o difusión externa.
3. El transporte al interior de la partícula adsorbente por difusión porosa y/o por difusión superficial.
4. La interacción energética entre las moléculas de adsorbato y los sitios donde tiene lugar la adsorción final.

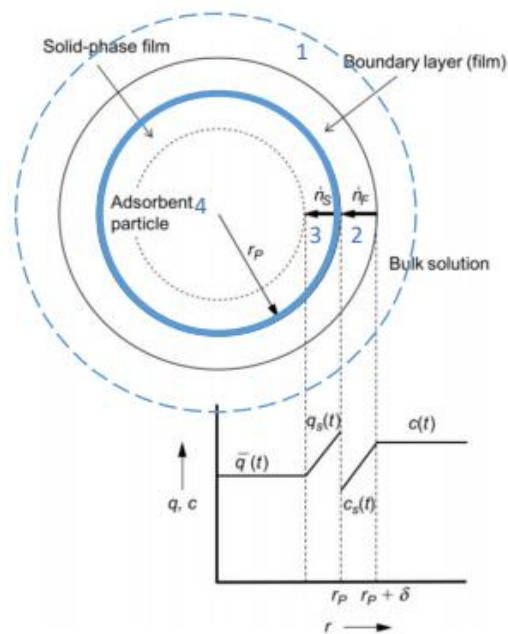


Figura 4-2 Perfiles de concentración en el caso de difusión externa e interna.

Fuente: (Castelló Torre, 2017, p. 15).

2.1.5 Carbón Activado

En el trabajo de (Achury Cadena, 2008, p. 3), define al carbón activado como “un producto derivado de materiales carbonosos, los cuales presentan un área superficial alta ($300 \text{ m}^2/\text{g}$ a $4000 \text{ m}^2/\text{g}$). Y su superficie presenta un grado de porosidad alto proporcionando propiedades adsorbentes que permiten adsorber una gran cantidad de compuestos en fase líquida y gaseosa. Estas fuerzas de atracción son conocidas como (fuerzas de Van Der Waals)”

“El carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y además, grupos funcionales (oxígeno y nitrógeno) y componentes inorgánicos provenientes de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción” (Luna et al., 2007, p. 42).

Por tanto podemos considerar al carbón activado como hidrófobo, debido a su poca afinidad al agua; pero la presencia de grupos funcionales en su superficie hace que puedan reaccionar con el agua, haciendo que la superficie sea más hidrófila (Luna et al., 2007, p. 42).

Y de acuerdo a (Luna et al., 2007, p. 42) “La oxidación de un carbón, produce la formación de grupos hidroxilo (OH^-), carbonilo (RCHO), carboxilo (RCOOH), etc., que le dan al carbón un carácter anfótero, esto es, carácter ácido y básico, a la vez, influyendo en la adsorción de muchas moléculas”

2.1.5.1 Estructura y propiedades del carbón activado

La estructura del carbón activado se puede definir como un material carbonoso poroso el cual es preparado a partir de un precursor a base de carbón con gases, y en muchos casos con la adición de productos químicos (por ejemplo, ácido fosfórico, cloruro de cinc, hidróxido de potasio, etc.), durante y después de la carbonización, permitiendo el aumento de la porosidad.

Según (Luna et al., 2007, p. 41), “la estructura del carbón activado está constituida por un conjunto irregular de capas de carbono, con espacios que constituyen la porosidad. Este ordenamiento al azar de las capas y el entrecruzamiento entre ellas impiden el ordenamiento de la estructura para dar grafito, aun cuando se someta a tratamientos térmicos de hasta 3000°C . Es precisamente, esta característica del carbón activado la que contribuye a su propiedad más importante, la estructura porosa interna altamente desarrollada y al mismo tiempo, accesible para los procesos de adsorción”

2.1.5.2 Especificaciones de calidad del carbón activado

- **Índice de yodo y área superficial**

De acuerdo a (Barazorda y Condori, 2019, p. 24) “el índice de yodo es un índice del área intrascendente de un carbón activado. Esto se debe a que el yodo adsorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite habitar hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción”.

Por lo tanto, la cantidad de yodo adsorbido es alícuota al área del carbón y por ende es la principal herramienta de control y valoración de calidad del carbón activado que el cliente puede realizar, además de ser un parámetro que mide el tiempo de vivacidad útil que resta del carbón en uso (Barazorda y Condori, 2019, p. 24).

- **Volumen total de poro**

(Barazorda y Condori, 2019, p. 24) define al volumen total de poro mediante su expresión en cm^3/g y es función tanto del tipo de materia prima, como de su grado de activación, su valor depende del radio medio de poro y del área superficial del carbón. La determinación del volumen de poro está dado por la siguiente ecuación:

$$V_p = \left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad \text{Ecuación 9-2.}$$

Donde:

V_p : Volumen total de poro.

p_1 : Peso del adsorbente empapado de agua (g)

p_2 : Peso del adsorbente seco (g).

- **Densidad aparente**

“La densidad aparente es el peso en g/cm^3 de carbón totalmente seco en aire y su valore se determina en gran medida al flujo necesario para lograr un buen retro lavado del carbón” (Barazorda y Condori, 2019, p. 25).

La densidad aparente está dado por la siguiente ecuación:

$$P_a = \left(\frac{m}{v}\right) \quad \text{Ecuación 10-2.}$$

Donde:

P_a : Densidad aparente

m : Masa del adsorbente (g)

v : Volumen ocupado por la muestra (cm³)

- **Densidad real**

La densidad real se define como una medida de sólidos, y se determina en base a “pesas de los vacíos internos y el volumen puede ser determinado por inmersión de una masa conocida de material en un recipiente de volumen conocido de un líquido humectante. El líquido debe penetrar completamente el material y desplazar a los gases atrapados” (Barazorda y Condori, 2019, p. 26). La densidad real está dado por la siguiente ecuación:

$$P_r = \left(\frac{p_1}{p_1 + p_2 - p_3} \right) \quad \text{Ecuación 11-2.}$$

Donde:

P_r : Densidad real.

P_1 : Peso del envase a usar (g)

P_2 : Peso de la muestra del carbón activado (g)

P_3 : Peso final de carbón activado y agua enrasada (g)

- **Porosidad**

“Es la fracción del volumen de una muestra que es ocupada por poro o espacio vacío” (Barazorda y Condori, 2019, p. 26). La porosidad se determina por la siguiente ecuación:

$$\%porosidad = \left(1 - \frac{P_a}{P_r} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 12-2.}$$

- **Humedad**

“El agua es uno de los componentes del carbón activado que se evapora, influyendo en los procesos de aprovechamiento del carbón” (Barazorda y Condori, 2019, p. 27).

El porcentaje de humedad es determinado con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 13-2.}$$

Donde:

M1: Peso inicial de la muestra (g)

M2: Peso final después del proceso de secado (g)

- **Materia volátil**

La materia volátil se define como desprendimientos gaseosos de la materia orgánica durante un proceso de calentamiento, al momento de calentar el carbón, este desprende productos gaseosos y líquidos. Estos productos son principalmente agua, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfuros de hidrógeno, metano, amoníaco, benceno, tolueno, naftaleno y vapores alquitranes (Barazorda y Condori, 2019, p. 28).

El porcentaje de materia volátil se determina con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Volatiles} = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_1} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 14-2.}$$

Donde:

M1: Peso inicial de la muestra (g)

M2: Peso de la muestra seca (g)

M3: Peso después del tratamiento térmico (g)

- **Contenido de cenizas totales**

El contenido de cenizas totales es el residuo restante después de un proceso de calcinación que se somete el carbón a 650°C, el cual debe llegar a peso constante y a partir de ahí se expresa en porcentaje en base seca (Barazorda y Condori, 2019, p. 28).

“La cantidad y composición de las mismas influyen en la adsorción y en algunas propiedades del carbón activado. En el caso de tratamiento de agua, la desventaja fundamental de las cenizas es que mientras mayor es su porcentaje, menor es la cantidad de carbón realmente efectivo” (Barazorda y Condori, 2019, p. 28).

El porcentaje de cenizas se determina por la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = \left(\frac{M4}{M2}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 15-2.}$$

Donde:

M2: Peso de la muestra seca (g)

M4: Peso final después del tratamiento térmico (g)

- **Carbón fijo**

El carbón fijo se define como la parte no volátil en estado sólido y ésta se encuentra en el residuo de carbón que queda en el crisol luego de determinar la materia volátil, por lo que generalmente el porcentaje de carbón fijo no se obtiene pesando el residuo, sino por diferencia de la humedad, las cenizas y las materias volátiles (Barazorda y Condori, 2019, p. 29).

La norma ASTM define la ecuación para determinar el carbón fijo:

$$\%Carbón\ fijo = 100\% - Humedad(\%) - materia\ volatil(\%) - cenizas(\%) \quad \text{Ecuación 16-2.}$$

2.1.6 Cromo

De acuerdo a varias fuentes el metal cromo se describe como un “elemento químico, símbolo Cr, número atómico 24 y peso atómico 51.996; es un metal de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados” (Lenntech, 2019).

Por otra parte (Molina, Aguilar y Cordovez, 2010, p. 81) define al cromo como “un elemento que se encuentra normalmente en rocas, animales, plantas y el suelo. Puede existir en formas diferentes y éstas determinan su estado líquido, sólido o gas. El cromo (0), cromo (III) y cromo (VI) son las formas más comunes en las que se encuentra este elemento”.

Por su parte (Leyva et al., 2008, p. 28) describe al cromo como “un metal reductor activo que en el medio ambiente se encuentra principalmente en las formas trivalente, Cr (III) y hexavalente, Cr (VI)”.

“El Cr (VI) es muy tóxico y tiene una gran movilidad mientras que el Cr (III) no es tóxico a bajas concentraciones y su movilidad es baja ya que el Cr (OH)₃ es poco soluble. En su aplicación industrial, forma parte de curtientes, pigmentos y conservantes textiles, aleaciones, pinturas anti-incrustantes, catalizadores, agentes anticorrosivos, lodos de perforación, baterías de alta temperatura, fungicidas, conservantes de madera, recubrimientos metálicos y electro galvanizados” (Leyva et al., 2008, p. 28).

2.1.6.1 El cromo en el medio ambiente

“El cromo se presenta en varias formas las cuales difieren en sus efectos sobre los organismos. El cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de Cromo (III) y Cromo (VI) a través de procesos naturales y actividades humanas, las mayores actividades humanas que incrementan las concentraciones de cromo (III) son el acero, las peleterías y las industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales del cromo (VI)” (Lenntech, 2019).

Tabla 2-2 Características del cromo en el uso industrial.

Cromo elemental Cr (0)	Cromo trivalente Cr (III)		Cromo Hexavalente Cr (VI)
Artículos metalizados cromados y acero inoxidable: -Resistentes a la corrosión -Pueden estar en contacto con alimentos -Implantes quirúrgicos	Pigmentos verde: - Insoluble, no biodisponible - CLP (etiquetado) “no peligroso”	Picolinato de cromo: - Soluble -Oligoelemento esencial - Suplemento dietario	Producto intermedio en metalurgia y síntesis química - Alta solubilidad, biodisponibilidad - Tóxico agudo, CMR - Fuerte sensibilizador

Fuente: (Tegtmeyer y Kleban, 2014)

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

“En su forma hexavalente, el cromo es tóxico para los humanos y los animales, por lo que debe manipularse con extremas condiciones de seguridad por empresas químicas profesionales y solo a través de los sistemas propios de las mismas se deben manejar los desechos, debido a que se trata de un riesgo potencial y estos son controlables” (Tegtmeyer y Kleban, 2014).

2.1.6.2 *El cromo y la salud*

En cuanto a la afectación que produce el cromo, (Molina, Aguilar y Cordovez, 2010, p. 82) describe en su trabajo “La absorción de cromo se hace fundamentalmente por tres vías: oral, respiratoria y dérmica. Al entrar en el organismo es distribuido a la médula ósea, pulmones, ganglio linfáticos, bazo, riñón e hígado. Los efectos adversos del cromo para la salud dependen, especialmente, del grado de valencia de este elemento en el momento de la exposición y de la solubilidad del compuesto. Las únicas formas de importancia en toxicología son el cromo VI y el cromo III. Una exposición de corta duración al cromo III puede causar irritación mecánica en los ojos y en el tracto respiratorio. Por su parte el cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud: cuando se encuentra como compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, por ejemplo, erupciones cutáneas; después de ser respirado el cromo (VI) puede causar irritación de la nariz y sangrado de ésta”.

“Los compuestos de cromo (VI) pueden ocasionar quemaduras en los ojos. Se estima que del 1 al 3% de la población general presenta alergia al cromo. El cromo hexavalente posee dos características que explican el grado de toxicidad. La primera de ellas, las membranas celulares son permeables al cromo VI, pero no al cromo III y en la segunda característica el cromo VI se reduce a cromo III en el interior de las células, tanto de las mitocondrias como en el núcleo” (Molina, Aguilar y Cordovez, 2010, p. 83).

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Planificación

3.1.1 Tipo de proyecto

El presente proyecto denominado “**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN A PARTIR DE CARBÓN ACTIVADO DERIVADA DE SEMILLAS DE *DATURA STRANOMIUM* PARA LA REMOCIÓN DE CROMO**” es de tipo técnico debido a que se desarrollará mediante una parte experimental a nivel de laboratorio para realizar los diferentes ensayos, así como también, incluye parte teórica para recabar información necesaria en el desarrollo del tema y efectuar la caracterización, comparación, diseño y validación del tema propuesto.

3.2 Materiales, Reactivos y Equipos

3.2.1 Muestra

Para la preparación del carbón activado en este proyecto se utilizó las semillas de *datura stranomium*.

3.2.2 Materiales

- Vasos de precipitación de 250 ml.
- Embudo
- Papel filtro
- Probeta de 1000 ml.
- Pipeta de 25 ml y 10 ml.
- Tubos de ensayo de 10 ml.
- Gotero
- Bureta de 50 ml.
- Guantes
- Crisoles
- Matraz Erlenmeyer 250 ml.
- Tamices
- Balones de aforo de 250 ml y 50 ml.

3.2.3 Reactivos

- Gas Nitrógeno

- Hidróxido de sodio al 10%
- Agua destilada
- Solución de cromo.
- Ácido Fosfórico 85%
- Alcohol 5% v/v
- Yoduro de potasio al 10%.

3.2.4 Equipos

- Mufla
- Reactor tubular de hierro.
- Agitadores
- Estufa
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro uv-visible
- Espectrofotómetro FT-IR
- Adsorción atómica

3.3 Metodología

Se realizó la caracterización de la muestra (semillas de datura), posterior a ello se procedió a la preparación del carbón activado y finalmente se realizó las pruebas de adsorción para determinar la capacidad de adsorción de cromo con el carbón activado obtenido.

3.3.1 Caracterización de la muestra (semillas de datura)

Los procedimientos utilizados en base a las normas ASTM 2867, ASTM 5832 y ASTM 2866 son:

3.3.1.1 Determinación de humedad.

- Se tomaron tres crisoles secos y en cada uno se pesó 5g de semillas de datura (M1).
- Se colocó la muestra en la balanza analítica para la determinación de humedad por 20 minutos.
- Luego se sacaron cada uno de la balanza y se pusieron a enfriar en un desecador hasta que se enfríen y se pesaron (M2).
- Finalmente se obtuvo el porcentaje de la humedad de acuerdo a cada ensayo realizado en la balanza de humedad.

3.3.1.2 Determinación de materia volátil

- Se tomó dos crisoles con la muestra obtenida anteriormente y se puso en la mufla a 700°C por 15 minutos.

- Se sacó, se enfrió en el desecador y se procedió a pesar (M3).
- Posterior a ello se calculó el porcentaje de material volátil utilizando la ecuación 14-2.

3.3.1.3 Determinación de cenizas

- El crisol adicional con muestra se llevó a la mufla a 700°C durante 1 hora.
- Luego se sacó, se puso en el desecador y se procedió a pesar (M4).
- Posteriormente se calculó el porcentaje de cenizas utilizando la ecuación 15-2.

3.3.1.4 Determinación de carbón fijo

- El carbón fijo se determinó utilizando la ecuación 16-2.

A continuación se muestra el diagrama de flujo con el proceso de preparación del carbón activado

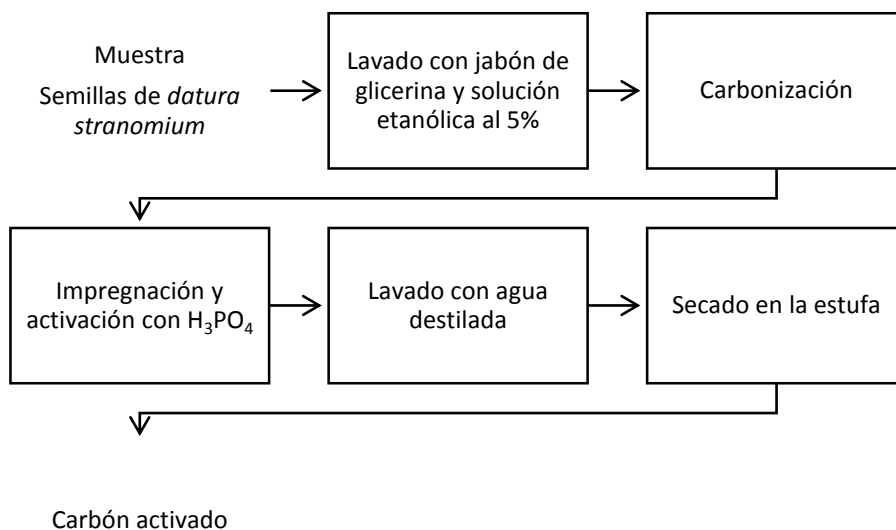


Gráfico 1-3 Diagrama de flujo del proceso de obtención del carbón activado.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2020

- Impregnación con H₃PO₄ al 85%, T= 80°C y t= 3h. Vol. de la solución =250 ml.
- Secado en la estufa a 70°C y t= 24h.
- Carbonización y activación m= 100g, flujo de N₂ = 100 cm³/min, T=400°C y t= 1h.
- Lavado con agua destilada T= 70-90°C pH= 6-7.

3.3.2 Preparación del carbón activado

Para un mejor resultado en la activación se procedió con el acondicionamiento de las semillas, la muestra fue lavada con agua, jabón de glicerina y con una solución etanólica al 5%. Posterior a ello se puso a secar en una estufa a 60°C durante 1h (Barazorda y Condori, 2019).

Después de lo expuesto se realizó las siguientes etapas descritas a continuación:

3.3.2.1 Carbonización

La muestra seca se colocó en un reactor tubular de fierro negro con control automático, además de una termocupla para verificar la lectura de la temperatura en el interior. Luego se procedió al encendido del equipo y se empezó con la carbonización. Durante todo el proceso de carbonización se trabajó con una atmósfera inerte de nitrógeno. La temperatura de carbonización fue de 400°C y 450°C durante 1 hora (Barazorda y Condori, 2019).

3.3.2.2 Impregnación y Activación

En las cápsulas se pesó 50g de carbón obtenido de las semillas de datura. Luego, ésta se impregnó con una solución de H_3PO_4 a una concentración del 85%, en relación 1:1, posteriormente se tapó cada cápsula con papel aluminio dejando agujeros de eliminación de vapor, por último se colocó las capsulas en bandejas de aluminio dentro de la estufa a una temperatura de 120°C y un tiempo de contacto de 24 horas.

3.3.2.3 Lavado y secado

La muestra carbonizada fue lavada varias veces con aproximadamente 250 ml de agua destilada caliente en una temperatura de entre 70 y 90°C con agitación constante hasta que el pH de la solución fue cercana a neutro, finalmente se llevó el carbón a secar en la estufa a 60°C por 24 horas (Barazorda y Condori, 2019).

3.4 Caracterización del Carbón activado

3.4.1 Porcentaje de humedad

- Se tomaron tres crisoles secos y en cada uno se pesó 5g de carbón activado (M1).
- Se colocó la muestra en la balanza analítica para la determinación de humedad por 20 minutos.
- Luego se sacaron cada uno de la balanza y se colocaron en un desecador hasta que se enfríen y se procedió a pesar (M2).

- Finalmente se obtuvo el porcentaje de la humedad de acuerdo a cada ensayo realizado en la balanza de humedad.

3.4.2 Porcentaje de ceniza

De acuerdo a la norma ASTM 2866, se determinó el contenido de ceniza:

- Primero se colocó la muestra de carbón activado (M2) en la mufla a una temperatura de 650°C por 3 horas.
- Se retiró y se dejó enfriar en el desecador
- Posterior a ello se pesó la muestra (M4).
- Finalmente se obtuvo el porcentaje de cenizas con la ecuación 15-2.

3.4.3 Densidad aparente

- La muestra se colocó en una probeta hasta enraizar 10 ml (volumen ocupado por la muestra, luego se pesó la cantidad de muestra en una balanza analítica.
- Los valores de la densidad aparente fueron calculados con la ecuación 10-2.

3.4.4 Densidad real

- Se pesó una fiola de 250 ml en la balanza analítica (w_1)
- Se pesó 5g de la muestra de carbón activado en la balanza analítica (w_2)
- Se colocó la muestra pesada (w_2) dentro de la fiola de 250 ml, se agregó agua destilada hasta la mitad de su volumen (100 ml), se agitó y se dejó reposar por 24 horas.
- Transcurrido 24 horas se enrasó con agua destilada y se pesó (w_3)
- Finalmente se obtuvo la densidad real con la ecuación 11-2.

3.4.5 Porcentaje de porosidad

De acuerdo a los resultados de la densidad aparente y la densidad real, se calculó el porcentaje de porosidad de acuerdo a la ecuación 12-2.

3.4.6 pH

El pH del carbón activado se determinó según la norma ASTM 3838.

- Se pesó 5g de carbón activado en un vaso de precipitación de 250 ml, se añadió 100 ml de agua destilada, se tapó con una luna reloj y se hizo hervir por 5 minutos en un reverbero en la campana extractora de gases.
- Se retiró y se decantó la muestra durante 10 minutos.
- Se enfrió a temperatura ambiente y finalmente se midió el pH con papel indicador.

3.5 Ensayo de Adsorción de Cromo

Las disoluciones de cromo fueron preparadas usando $K_2Cr_2O_7$, se preparó una disolución patrón (1000 mg/L) de Cr mediante la adición de 2.83 mg $K_2Cr_2O_7$ en un litro de agua destilada y desionizada. A partir de ella se prepararon las diluciones necesarias para cada prueba y luego se ajustaba el pH de cada disolución agregando gota a gota una solución diluida de H_2SO_4 hasta llegar a un pH de 3 (Albis Arrieta, Ortiz Toro y Martínez De la Rosa, 2017).

3.5.1 Determinación de la concentración de Cr

La concentración de Cr (VI) en solución acuosa se determinó por el método de espectrofotómetro uv-visible. Este método se basa en la realización de una curva de calibración en base a concentraciones estándar conocidas del Cr (VI). La concentración de las diferentes muestras se obtiene de acuerdo a la absorbancia que mide el espectrofotómetro uv-visible y en base a la curva de calibración nos da como resultado las concentraciones de las diferentes diluciones en base a los tratamientos realizados.

3.5.2 Diseño experimental

El experimento se planteó de acuerdo a 3 variables independientes con repetición, en la adsorción de cromo con carbón activado obtenido a partir de las semillas de datura donde se han considerado las variables independientes pH, dosis del adsorbente y el tiempo de contacto.

Tabla 1-3 Modelo del diseño experimental de acuerdo a las variables independientes.

Tratamiento	pH Inicial	Tiempo de contacto h	Cantidad de carbón mg
T1Cr	3	1	50
T2Cr	3	1	100
T3Cr	3	3	50
T4Cr	3	3	100
T5Cr	5	1	50
T6Cr	5	1	100
T7Cr	5	3	50
T8Cr	5	3	100
T9Cr	4	2	75

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.5.3 Determinación de la isoterma de adsorción

Para determinar la isoterma de adsorción se procedió con el siguiente procedimiento:

- Se pesaron 0,1 gramos en las 5 muestras.
- Se puso cada una de las muestras de carbón activado en contacto con cada muestra de 50 mL de solución de cromo.
- Se procedió a agitar cada una de las muestras a 350 rpm y pH inicial de 3.
- El tiempo de la adsorción para cada muestra fue obtenida de acuerdo al ensayo anterior.

Tabla 2-3 Modelo de matriz para la isoterma de adsorción.

Muestra	Carga de carbón (g)	Volumen (L)	Concentración inicial de la solución de cromo (mg/L)	Concentración final de solución de cromo (mg/L)	Capacidad de adsorción del adsorbente (mg/g)
1	0,1	0,05			
2	0,1	0,05			
3	0,1	0,05			
4	0,1	0,05			
5	0,1	0,05			

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

La capacidad de adsorción se determinó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{p} \quad \text{Ecuación 1-3.}$$

Donde:

q_e = Capacidad de adsorción (mg/g).

V: Volumen fijo de solución de cromo (L).

C_o = Concentración de cromo inicial de la solución (mg/L).

C_e = Concentración de cromo final de la solución (mg/L).

P= Peso del carbón activado (g).

Los resultados experimentales de las isotermas se correlacionaron con los modelos matemáticos de las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich. Los parámetros “m”, “b”, “K” y el coeficiente de correlación se determinaron en base a las ecuaciones de regresión con Microsoft Excel.

3.6 Diseño de la columna de adsorción.

El diseño de la columna de adsorción tuvo como base varios estudios en los cuales se enfocan en la elección del adsorbente, el tamaño de la partícula y la velocidad necesaria para la obtención del área y longitud del lecho para el cumplimiento de un ciclo.

Además se tuvo en cuenta basado en los parámetros de diseño de (Boutinaud, 2016, p. 14), “los lechos fijos o camas de adsorbentes pueden ser seleccionados de acuerdo al objetivo del proceso, por ello en casos de pérdida de carga mínima, los valores adecuados son los de diámetro de lecho bajos; por otra parte, para maximizar la disminución de la humedad del aire se recomienda utilizar un lecho de desecante con diámetro de lecho alto, finalmente en un aumento en la caída de presión se relaciona con el aumento de la relación de diámetro del lecho”

3.6.1 Zona de transferencia de masa

Para el desarrollo se debe tener presente la zona de transferencia de masa, la cual “existe en todos los adsorbentes, la profundidad del lecho es la dimensión del adsorbente en la dirección del flujo del aire, en cambio la zona de transferencia de masa es por lo general más corta que la profundidad del lecho y se mueve a través del lecho a medida que el lecho alcanza su capacidad” (Boutinaud, 2016, p. 16).

La figura 1-3 nos muestra la saturación de lecho que se da cuando la zona de transferencia de masa llega al final del lecho.

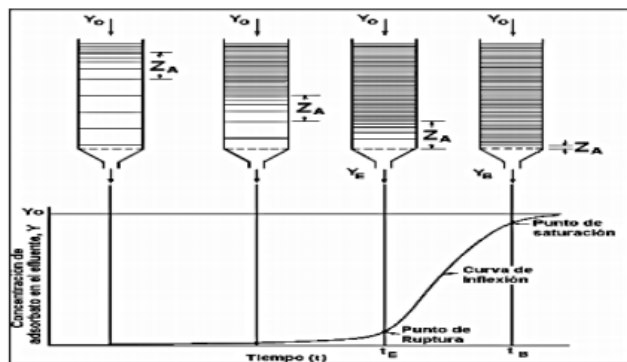


Figura 1-3 Proceso de adsorción en lecho fijo.

Fuente: (Boutinaud, 2016, p. 17).

En la figura 1-3, observamos el proceso de adsorción en lecho fijo y el perfil de concentración que se va dando a lo largo del proceso, desde su inicio de la adsorción, hasta el punto de saturación completa del lecho (Boutinaud, 2016, p. 17).

3.6.2 Desarrollo de las Isotermas de Adsorción

3.6.2.1 *Isoterma de Langmuir*

(Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 52) describe a las isotermas experimentales desarrolladas por Langmuir. “Se suponen hipótesis de temperatura constante, adsorción localizada, la superficie es homogénea y se asume que cada sitio de adsorción puede adherirse sólo a una molécula de adsorbato. La energía de adsorción es la misma para todos los sitios de adsorción. No existe interacción entre las moléculas adsorbidas”

La isoterma de adsorción de Langmuir se define como:

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e} = q_e \quad \text{Ecuación 2-3.}$$

Donde:

x/m = concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato/g de adsorbente.

a, b = constantes empíricas.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

“El equilibrio se da cuando la ratio de adsorción de las moléculas en la superficie es el mismo al ratio de desorción de las moléculas en la superficie, que es la diferencia entre la cantidad adsorbida en una concentración particular y la cantidad que podría ser adsorbida en la concentración. En el equilibrio, esa diferencia es cero” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 52).

Las constantes de la isoterma de Langmuir pueden ser determinadas mediante $C_e/(x/m)$ versus C_e utilizando su fórmula lineal tenemos:

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e \quad \text{Ecuación 3-3.}$$

3.6.2.2 *Isoterma de Freundlich*

(Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 53) en su trabajo expresa que para la isoterma de Freundlich supone hipótesis de temperatura constante, superficie rugosa y distribución exponencial de la energía de los sitios de adsorción, de acuerdo a esto la ecuación derivada empíricamente en 1912 de la isoterma de Freundlich es:

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad \text{Ecuación 4-3.}$$

Donde:

x/m = concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato/g adsorbente.

K_f = Constantes empíricas. Factor de la capacidad de Freundlich. $(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$ Representa la cantidad de colorante o materia adsorbido por unidad de concentración en el equilibrio.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de adsorción, mg/L.

$1/n$ = Factor de la intensidad de Freundlich. Representa la heterogeneidad de la superficie (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 53).

Las constantes en la ecuación de isoterma Freundlich pueden determinarse mediante logaritmos como se muestra a continuación:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log(K_f) + \log(C_e) \quad \text{Ecuación 5-3.}$$

3.6.2.3 *Adsorción en Batch*

“En el proceso de adsorción Batch, ni el adsorbato ni el adsorbente fluyen, el ratio de adsorción del adsorbato se controla mediante un balance de masa, en donde se debe de tener en cuenta cuanto carbón activado se ha añadido a la mezcla” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 53).

El resultado de dicha expresión en el equilibrio es:

Cantidad de reactante adsorbido en el sistema = Cantidad inicial de reactante – Cantidad final de reactante.

$$q_e M = V C_o - V C_e \quad \text{Ecuación 6-3.}$$

Donde:

q_e = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

M = Masa de adsorbente, g.

V = Volumen de líquido en el reactor, L.

C_0 = Concentración inicial de adsorbato, mg/L

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

En lo referente a la capacidad de adsorción de un adsorbente este se puede estimar a través de los datos de las isothermas de adsorción. Y de acuerdo a (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 54) “la capacidad de adsorción del carbón puede ser estimada extendiendo una línea vertical desde el punto donde el eje horizontal corresponde a la concentración inicial C_0 , y extrapolando la isoterma para que intercepte con esa línea. El valor en el punto de la intersección $[(x/m)]$ o q_e puede ser leído en el eje vertical y representa la cantidad de constituyente adsorbido por unidad de masa de carbón cuando el carbón activado está en el equilibrio con la concentración inicial del constituyente C_0 . El equilibrio generalmente aparece en la sección superior durante el tratamiento mediante columnas y representa la más alta capacidad del carbón para adsorber en un sistema de aguas concreto”

3.6.2.4 Adsorción en continuo

“A diferencia de los reactores batch, en un proceso continuo el agua residual pasa por medio de una columna de carbón activado, los contaminantes se separan paulatinamente y el agua residual se va clarificando de manera gradual, no obstante no existe una separación absoluta entre el agua tratada y la alimentación” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 55).

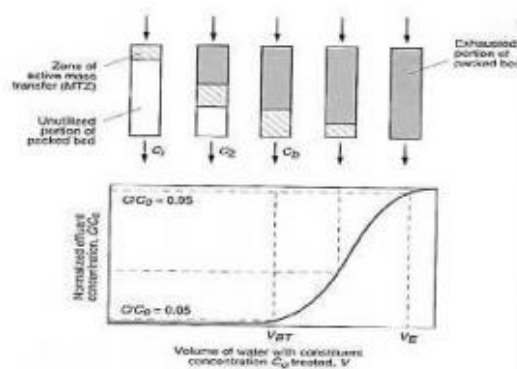


Figura 2-3 Curva de ruptura típica para el carbón activado.

Fuente: (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 55).

En la figura 2-3, observamos a el lecho de carbón activado que va saturándose hasta que llega a su máxima capacidad de adsorción, este movimiento en la zona de adsorción se puede apreciar

de mejor manera con las curvas de ruptura, las ordenadas de una curva de ruptura representan a la concentración del efluente y las abscisas representan que tanto dura el flujo por medio de la columna en tiempo” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 56).

3.6.2.5 Contactores de Adsorción

“Existen muchos tipos de contactores de carbón activado utilizados para eliminar componentes, por lo general se utilizan los contactores presurizados con flujo descendente como se ve a continuación” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 57).

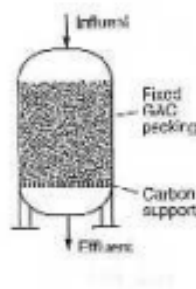


Figura 3-3 Configuración de contactores de carbón activado.

Fuente: (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 57).

El diseño y el dimensionamiento de los contactores son basados en los parámetros como el tiempo de contacto o el caudal de entrada. Se establece un estado estable de balance de masa alrededor del lecho de carbón activado que se transforma en:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} - \text{Cantidad adsorbida}$$

$$0 = QC_o t - QC_e t - m_c q_e \quad \text{Ecuación 7-3.}$$

Donde:

Q = Tasa de flujo volumétrico, L/h.

Co = Concentración inicial de adsorbato, mg/L.

t= tiempo, h.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

m_c = Masa de adsorbente, g.

q_e = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato/g adsorbente.

De la ecuación 1-3., el ratio de uso del carbón activo se define como:

$$\frac{m_c}{Q} = \frac{C_o - C_e}{q_e} \quad \text{Ecuación 8-3.}$$

Se asume que la masa de adsorbato en el poro es demasiado pequeña en comparación a la cantidad adsorbida, así $QC_e t$ en la ecuación 3.1. Se puede despreciar y el ratio de adsorbente se simplifica:

$$\frac{m_c}{Q} \approx \frac{C_o}{q_e} \quad \text{Ecuación 9-3.}$$

La cantidad del carbón activado en la operación de contactores y por tanto su dimensionamiento, se basa en el tiempo de lecho en vacío:

$$E = \frac{V_E}{Q} \quad \text{Ecuación 10-3.}$$

Donde:

E = vida de contacto, h

V_E = volumen del contactor ocupado por el carbón activado, m³.

Q = Caudal continuo, m³/h.

Es importante también conocer el tiempo de residencia, o el tiempo que será efectivo ese carbón activo antes de reponerlo” (Avila, Puello y Castilla, 2019, p. 58).

$$B = \frac{V_E d \text{ at } \rho E}{Q} \quad \text{Ecuación 11-3.}$$

Donde: Volumen de agua tratada para EBCT, L.

Q = caudal de entrada, L/día.

3.7 Dimensionamiento y Cálculos del sistema de columnas

3.7.1 Condiciones de operación

En el planeamiento del proyecto se decidió diseñar con un adsorbato de cromo y una concentración inicial, considerándolo siempre constante, para ver la reacción del carbón activado granular obtenido a partir de las semillas de datura ante el fenómeno de adsorción.

Las condiciones de operaciones, cálculos, dimensionamientos, consideraciones, especificaciones y demás datos son los siguientes:

- **Densidad aparente del CAG**

$$P_a = 640 \text{ Kg}/m^3$$

De acuerdo a los análisis realizados del carbón activado granular derivada de las semillas de datura su densidad aparente es de 640 g/L. Posteriormente será utilizada para determinar la masa del carbón activado requerido.

- **Caudal**

$$Q = 15L/min$$

- **Concentración inicial de la solución de cromo**

$$C_o = 5mg/L$$

- **Concentración final de la solución de cromo**

$$C_e = 1 \text{ mg}/L$$

- **Ecuación de isoterma de adsorción Tipo I de Langmuir**

Tabla 3-3 Parámetros Langmuir estimados para adsorción de cromo

Parámetros Langmuir estimados	
a	5.23527
B	7215,25
R ²	0,9807

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

3.7.2 Dimensionamiento de lecho de carbón activado

Se determinó diseñar una columna de adsorción basado en un diseño continuo a través de los contactores. Para ello, se calculó la relación de carbón activado para tratar el cromo. El carbón activado estimado se calcula con la ecuación 3.8, el parámetro q_e se sustituye por la ecuación 3.2. De la isoterma de Langmuir pero se sustituye el factor C_e por C_o por la formulación del proceso continuo en contactores encontrando la relación de carbón activado m_c/Q (Avila, Puello y Castilla, 2019).

La isoterma de Langmuir Tipo I:

$$q_e = \frac{abC_o}{1+bC_o} \quad \text{Ecuación 12-3.}$$

Reemplazado el término q_e de la ecuación 12-3 en la ecuación 8-3., tenemos:

$$\frac{m_c}{Q} = \frac{C_o - C_e}{\frac{abC_o}{1 + bC_o}} = \frac{(10 - 1)}{\frac{(5,23527)(7215,25)(10)}{1 + (7215,25)(10)}} = 1,7191g \text{ Carbón Activado/L}$$

- **Masa de carbón activado**

Para determinar la masa de carbón activado requerido y considerando un contactor de adsorción de 4 horas:

$$\frac{m_c}{Q} = 1,7191g \text{ Carbón Activado/L} \quad \text{Ecuación 13-3.}$$

$$t = 4 \text{ horas} = 240 \text{ minutos}$$

$$m_c = (1,7191g \text{ Carbón activado/L})Q = (1,7191g/L)(15L/m)(240 m)$$

$$m_c = 6188,8783 g \text{ Carbón Activado}$$

$$m_c = 6,188783 Kg \text{ Carbón Activado}$$

- **Volumen del lecho de carbón activado**

$$V_c = \frac{m_c}{P_c} = \frac{6188,9641 g \text{ Carbón Activado}}{640 g/L} = 9,670122L \quad \text{Ecuación 14-3.}$$

Determinación de altura de lecho de carbón activado

Diámetro Nominal	Diámetro Interior	Espesor Nominal	Presión de Trabajo		
			MPa	PSI (lb/pulg ²)	Kgf/cm ²
90	86.4	1.8	0.63	91	6.43
	86.2	1.9	0.80	116	8.16
	85.6	2.2	1.00	145	10.20
	84.4	2.8	1.25	181	12.75

Figura 4-3 Tuberías de Presión Plastigama.

Fuente: (Plastigama, 2018).

- **Área transversal de lecho**

Para un diámetro nominal de 90 mm seleccionado para la columna de carbón activado

$$A_T = \frac{\pi D_i^2}{4} = \frac{\pi(0,0864m)^2}{4} = 0,005863m^2 \quad \text{Ecuación 15-3.}$$

- **Altura de lecho H_c**

$$H_c = \frac{V_c}{A_T} = \frac{(9,670122L)(1m^3/1000L)}{0,005863 m^2} = 1,64934m \quad \text{Ecuación 16-3.}$$

- **Altura total de la columna**

$$H_T = 1,2 * H_c = 1,2(1,64934m) = 1,9792 m$$

- **Altura total de cada columna y lecho**

$$H_T \text{ y } 2 = \frac{1,9792m}{2} = 0,9896m$$

$$H_c = \frac{1,64937m}{2} = 0,825m$$

Tabla 4-3 Resultado del diseño de columnas y lecho de adsorción de cromo.

Dimensiones	Longitud
Diámetro interno columna	0,0864 m
Altura Lecho Carbón Activado	0,825 m
Altura de Columna	0,9896 m

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.7.3 Caídas de presión

Para la estimación de las caídas de presión teóricas para la selección de la bomba del sistema de adsorción de cromo a través del lecho de carbón activado granular en contacto continuo, se establecieron las condiciones como: el fluido a bombear, sus propiedades, las dimensiones, longitud de tubos, diámetros y accesorios usados en el sistema de tubería, además de las dimensiones y contenidos del lecho, y propiedades o especificaciones del carbón activado que permitan determinar las caídas de presión a través de él.

Tabla 5-3 Propiedades del fluido.

FLUIDO Y PROPIEDADES		
Fluido	AGUA	
Temperatura	30	°C
Densidad	996	Kg/m ³
Viscosidad	0,0008	Pa.s

Fuente: (Avila, Puello y Castilla, 2019)

Tabla 6-3 Características del tanque de almacenamiento.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO		
Material	Polietileno	
Capacidad	80	L

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 7-3 Características adicionales del tanque de almacenamiento.

DIMENSIONES DEL TANQUE		
Altura		
Diámetro inferior	45	cm
Diámetro superior	56	cm

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 8-3 Parámetros de operación.

PARÁMETRO DE OPERACIÓN		
Caudal	15	L/min
	$2,5 \times 10^{-4}$	m ³ /s
Volumen	60	L
Nivel de agua en el tanque	0,4	m

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 9-3 Características de la tubería.

TUBERÍAS							
Material	PVC	Rugosidad	$1,5 \times 10^{-6}$	m	Presión	500	Psi
Diámetro Nominal			Diámetro Interno		Longitud		Rugosidad Relativa
Tubería 1	½	pulgadas	0,0166	m	10	m	9×10^{-5}
Tubería 2	1	pulgadas	0,02848	m	0,5	m	$5,3 \times 10^{-5}$
Tubería 3	3	pulgadas	0,0864	m	2	m	$1,8 \times 10^{-5}$

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.7.4 Cálculo de pérdidas por fricción

Las siguientes ecuaciones se utilizan para el cálculo de las pérdidas de presión para cada tubería tanto por fricción como por accesorios:

- Número de Reynolds

$$R = \frac{v D \rho}{\mu}$$

Ecuación 17-3.

- **Área de Flujo**

$$A_f = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad \text{Ecuación 18-3.}$$

- **Velocidad de Flujo**

$$V_f = \frac{Q}{A_f} \quad \text{Ecuación 19-3.}$$

Tabla 10-3 Condiciones de flujo en tuberías.

CONDICIONES DE FLUJO EN TUBERÍA						
Nº tubería	Diámetro Nominal	Caudal (m³/s)	Diámetro Interno (m)	Área de Flujo (m²)	Velocidad de Flujo (m/s)	Reynolds
1	½	2,5 x10 ⁻⁴	0,0166	2,16x10 ⁻⁴	1,16	212206,59
2	1	2,5 x10 ⁻⁴	0,02848	6,37x10 ⁻⁴	0,39	208731,53
3	3	2,5 x10 ⁻⁴	0,0864	5,86x10 ⁻³	0,04	191232,00

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

- **Estimación de factores de fricción de Darcy:**

El factor de fricción por método de Swamee (Régimen turbulento):

$$f = \frac{0,2}{\left(\log\left(\frac{RR}{3,7} + \frac{5,7}{R^{0,9}}\right)\right)^2} \quad \text{Ecuación 20-3.}$$

Tabla 11-3 Factor de fricción

CONDICIONES DE FLUJO EN LA TUBERÍA		
Nº Tubería	Diámetro Nominal	Factor Darcy
1	½	0,01291
2	1	0,0126928
3	3	0,012645

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Se calcularon las pérdidas por fricción de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$H_f = \frac{f * L * v^2}{D_i * 19,6} \quad \text{Ecuación 21-3.}$$

Se calcularon las caídas de presión en (Psi) por fricción mediante:

$$\Delta P_F = H_F * \rho * g * 1,4566x10^{-4}$$

Tabla 22-3 Pérdidas por fricción en Tuberías.

CONDICIONES DE FLUJO EN TUBERÍA			
N° Tubería	Diámetro Nominal	Pérdidas por fricción H_f (m)	Caídas de presión por fricción ΔP_F (Psi)
1	1/2	0,5295	0,7529
2	1	$1,73 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-3}$
3	3	$2,39 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 33-3 Pérdidas por fricción totales en Tuberías.

Pérdidas Totales por fricción H_f (m)	Caídas de presión por fricción ΔP_F (Psi)
0,531226	0,75537

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.7.5 Cálculos de caída de presión por accesorios

A continuación se enlista una tabla con sus accesorios y dimensiones, para la estimación de las pérdidas de carga de los mismos, además de ello se tendrá en cuenta los coeficientes de pérdida K, correspondiente a cada accesorio y basado en el régimen de turbulencia se calculan las pérdidas mediante la siguiente ecuación:

$$H_A = \frac{8 \sum K_A Q^2}{9,8 \pi^2 D_i^4} \quad \text{Ecuación 22-3.}$$

Tabla 44-3 Pérdidas por accesorios en la Tubería 1.

PERDIDAS POR ACCESORIOS				
N° Tubería	Diámetro Nominal (Pulg)	Diámetro Interno (m)	Caudal (m³/s)	Factor de fricción Darcy
1	1/2	0,0166	$2,5 \times 10^{-4}$	0,0249
Accesorios	Cantidad	Constante de pérdida K	H_A (m)	ΔP_A (Psi)
Válvula de Bola	1	0,500	0,0340394	0,0483957
Codo 90°	8	0,497	0,2706812	0,3848432
Unión Universal	6	0,050	0,0204236	0,0290374
Válvula Compuerta	2	0,199	0,0270954	0,0385230
Expansión Abrupta	2	0,922	0,1255373	0,1784836
Reducción Abrupta	2	0,922	0,1255373	0,1784836

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

Tabla 55-3 Pérdidas totales por accesorios Tubería 1.

Pérdidas por accesorios H_A (m)	Caídas de presión total por accesorios ΔP_A (Psi)
0,6033142	0,857767

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 66-3 Pérdidas por accesorios Tubería 2.

PERDIDAS POR ACCESORIOS				
Nº Tubería	Diámetro Nominal (Pulg)	Diámetro Interno (m)	Caudal (m ³ /s)	Factor de fricción Darcy
2	1	0,0285	2,5x10 ⁻⁴	0,0284
Accesorios	Cantidad	Constante de pérdida K	H_A (m)	ΔP_A (Psi)
Válvula de Bola	1	0,500	0,0039177	5,57x10 ⁻³
Codo 90°	0	0,497	0,000	0,000
Unión Universal	1	0,057	0,0004466	6,35x10 ⁻⁴
Válvula Compuerta	0	0,199	0,000	0,000
Reducción tanque a tubería	1	1	0,0078355	1,11x10 ⁻²

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 77-3 Pérdidas totales por accesorios Tubería 2.

Pérdidas por accesorios H_A (m)	Caídas de presión total por accesorios ΔP_A (Psi)
0,0121998	0,001753

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.7.6 Cálculos de caídas de presión por el lecho de la columna

Las siguientes dimensiones y parámetros se establecen para sus cálculos posteriores:

Tabla 8-3 Características de la columna del carbón activado.

COLUMNA	CARBÓN ACTIVADO	
Dimensiones		
Diámetro interno	0,0864	m
Altura lecho	0,825	m
Área de flujo	0,005863	m ²

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 19-3 Propiedades del Carbón Activado

PARÁMETROS DEL LECHO DEL CARBÓN ACTIVADO		
Porosidad del lecho ϵ	1,200	-
Velocidad del Fluido U_o	0,04	m ³ /s
Diámetro Partícula D_p	0,0005	m
Densidad Partícula ρ_p	1010	kg/m ³
Densidad Aparente ρ_A	640	kg/m ³
Esfericidad \emptyset	0,45	-

Realizado por: Espinoza, Jhoe, 2021.

Mediante la información obtenida en la tabla 17-3 y 18-3 se procede a calcular la caída de presión mediante la ecuación llamada expresión de Ergun para determinar la caída de presión en lechos (Avila, Puello y Castilla, 2019):

$$\Delta P = \left[\frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu U_o}{(\emptyset D_p)^2} + 1,7 \frac{(1-\epsilon)\rho U_o^2}{\epsilon^3 \emptyset D_p} \right] L \quad \text{Ecuación 23-3.}$$

Tabla 209-3 Caída de presión en el lecho de Carbón Activado

CAÍDA DE PRESIÓN EN EL LECHO DE CARBÓN ACTIVADO H_L			
Lecho	Caída de Presión Lecho (Pa)	Caída de Presión Lecho (Psi)	Pérdida Total lechos (H_L)
1	112575,2966	16,33	13,92
2	112575,2966	16,33	13,92
PÉRDIDA TOTAL LECHOS		32,66	27,84

Realizado por: Espinoza, Jhoe, 2021.

3.7.7 Caída de presión total del sistema

Para los cálculos de las pérdidas totales y caídas de presión totales se usan las siguientes ecuaciones:

- **Pérdida de carga total en (m)**

$$H_{F \text{ total}} = H_F + H_A + H_L \quad \text{Ecuación 24-3.}$$

- **Caída de presión total en (Psi)**

$$\Delta P_{F \text{ total}} = \Delta P_F + \Delta P_A + \Delta P_L \quad \text{Ecuación 25-3.}$$

Tabla 101-3 Pérdidas y caídas de presión totales del sistema.

CAÍDAS DE PRESIÓN TOTAL DEL SISTEMA	
Perdidas H_F (m)	28,98
Caídas de presión ΔP_A (Psi)	34,29

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

3.7.8 Potencia de Bombeo

La ecuación necesaria para estimar la potencia de bombeo mínimo del sistema:

$$P = \frac{H_F \rho g Q}{n} = \frac{28,85 * 996 * 9,8 * 2,5 * 10^{-4}}{0,75} = 94,31445 \text{ W} = 0,1264 \text{ HP} \quad \text{Ecuación 26-3.}$$

La selección óptima de la bomba es de 1/2 HP la cual cumple con los requerimientos mínimos.

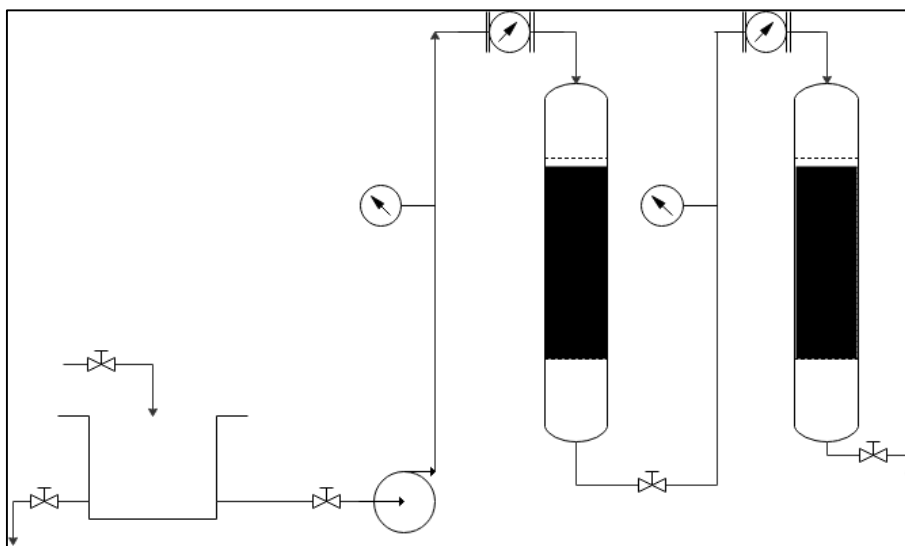


Gráfico 2-3. Diagrama PFD del equipo diseñado.

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

El diseño del equipo obtuvo una concordancia con los datos teóricos estipulados en el diseño con respecto a los datos experimentales, en el caso del estudio con el carbón activado de las semillas de *datura stramonium*, se puede observar una capacidad de adsorción aceptable en la eliminación de cromo, concluyéndose así que en procesos de lechos fijos a escala de laboratorio puede generarse beneficios tanto por su moderada efectividad en el proceso como también por su factibilidad económica y recursos utilizados.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Caracterización de la muestra (semillas de datura)

Tabla 1-4 Resultados de la caracterización de la muestra (semillas de datura)

Muestra	% Humedad	% Materia volátil	% Cenizas	% Carbón fijo
Semillas de Datura (Muestra 1)	9,825	70,66	19,37	0,136

Realizado por: Espinoza. Jhoe, 2021.

La tabla 1-4, muestra que las semillas de datura obtenidas en las instalaciones de la Facultad de Ciencias, tiene un contenido de carbón fijo de 0.136%, éste valor en comparación a una investigación realizada por (Barazorda y Condori, 2019), determina que la cáscara de castaña es un material precursor y aceptable para la obtención de carbón activado, por otra parte en el contenido de ceniza de 19.37% de las semillas es muy alto a comparación de otras muestras como en este caso la cascara de castaña la cual posee un contenido de ceniza de 0.84% (Barazorda y Condori, 2019), lo que nos da como indicativo un bajo rendimiento en la preparación del carbón activado derivada de las semillas.

En cuestión del contenido de humedad (9.825%) no varía significativamente, por otra parte la materia volátil de las semillas de datura es de 70.66%, indicándonos que generan una mayor área superficial en su transformación de carbón activado pero en comparación a lo estudiado por (Barazorda y Condori, 2019), la cáscara de castaña cuenta con una mayor cantidad de materia volátil (84.21%) por ende genera una mayor área superficial en su transformación en carbón activado.

4.2 Caracterización del carbón activado

Tabla 211-4 Resultados del carbón activado de las semillas de datura

Muestra	Humedad %	Ceniza %	Densidad aparente (g/mL)	Densidad real (g/mL)	Porosidad %	pH
Carbón activado semillas de datura	3,75	15,93	0,64	1,79	89,63	6-7
Carbón activado comercial	5	2	0,54	-	80	9-10

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021

En la tabla 2-4, se puede observar que el porcentaje de humedad del carbón activado de las semillas de datura 3,75% no difiere notablemente al carbón activado comercial, por tanto se asume este valor como aceptable para su aplicación en la adsorción de cromo.

El carbón activado de semillas de datura posee un alto contenido de cenizas (15,93%) con respecto al carbón activado comercial, este valor nos indica que se volatilizó gran parte de las sustancias orgánicas y la otra parte se transformó en carbón por lo que se produjo una disminución de la cantidad de carbón fijo y cenizas. La diferencia de contenido de ceniza nos da un indicativo de tener una menor temperatura de ignición, siendo esta propiedad importante para el almacenamiento del carbón activado (Barazorda y Condori, 2019).

Por otra parte se puede apreciar que no hay diferencias significativas entre las densidades aparentes del carbón activado comercial y el carbón activado de las semillas de datura; además el pH del carbón activado de las semillas de datura se encuentra cerca del rango neutro, esto después de someterse a la activación química mediante el agente impregnante del ácido fosfórico y el posterior ajuste de pH con una solución de NaOH.

Por último el porcentaje de porosidad se encuentra cerca del rango con respecto al carbón activado comercial con un valor de 89,63%, evidenciando una óptima activación química tanto con el agente impregnante empleado, así como las condiciones a las que se sometió.

4.3 Resultados espectros FT-IR

4.3.1 Espectro del carbón obtenido a partir de las semillas de *datura stramonium*

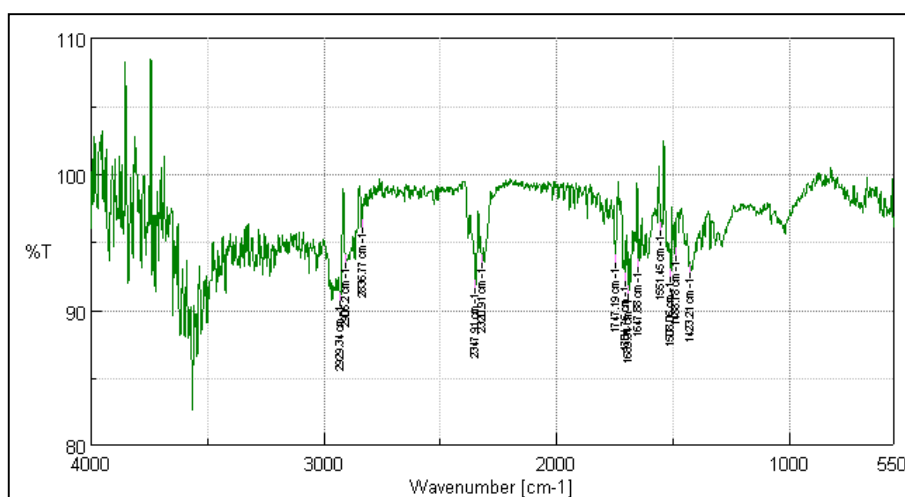


Figura 1-4 Espectro IR del carbón derivada de las semillas de *datura stramonium*

Realizado por: Laboratorio de Química Instrumental ESPOCH, 2021

Tabla 3-4 Wavernumber vs %T. Carbón de semillas de *datura stranomium*

Wavernumber [cm ⁻¹]	%T
2929,34	90,6409
2906,2	93,4682
2836,77	96,0492
2347,91	91,6382
1747,19	93,4569
1704,76	92,1253
1647,88	93,1817
1551,45	95,9084
1508,06	92,457
1423,21	92,7502

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021

La figura 1-4 y la tabla 3-4 son los resultados del análisis IR que se realizó al carbón obtenido derivada de las semillas de *datura stranomium*, como se puede observar los picos más prominentes son 2929,34 cm⁻¹ lo que hace referencia al grupo funcional asociado a un metil –CH₃ además de una tensión –CH₂-. En la longitud de onda de 2347,91 indican la presencia de una tensión –NH₂⁺.

Por último se puede identificar el número de onda 1747,19 el cual muestra una intensidad alta con una presencia de tensión de éster R-C(O)-OR, mientras el enlace con una intensidad fuerte de organosulfatos RO-SO₂-OR' presente en la longitud de onda 1423,21.

4.3.2 Espectro del carbón activado

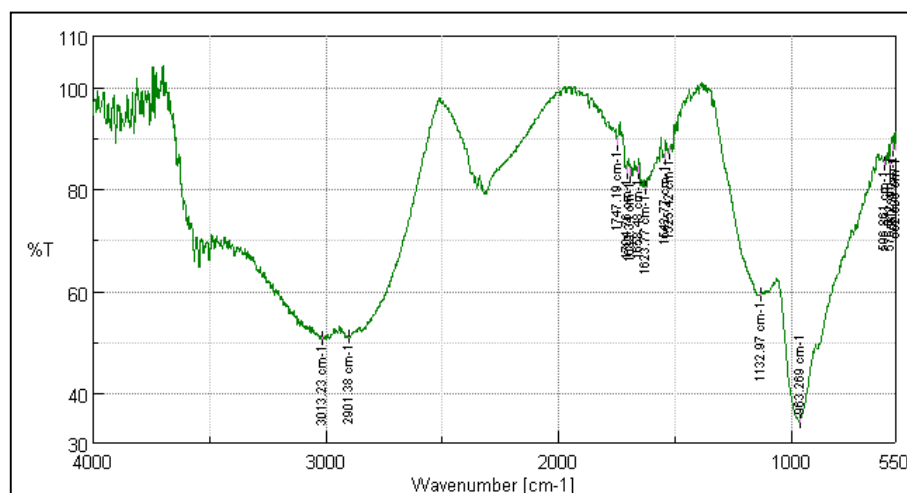


Figura 2-4 Espectro IR del carbón activado

Realizado por: Laboratorio de Química Instrumental ESPOCH, 2021.

Tabla 4-4 Wavernumber vs %T. Carbón activado obtenido

Wavernumber [cm ⁻¹]	%T
3013,23	50,3909
2901,38	50,6809
1747,19	88,7892
1704,76	83,2108
1689,34	82,5118
1525,42	87,0548
1132,97	58,9865
963,269	34,0855
596,861	84,6878
576,612	84,7214
560,22	87,4862
552,506	87,3291

Realizado por: Espinoza Jhoe, 2021.

El diagrama FT-IR, figura 2-4, presenta una banda característica en la longitud de onda de 963,269 cm⁻¹ la cual muestra un pico ancho y largo mismo que representa la tensión P-O-P, este enlace indica la presencia de fósforo en la muestra caracterizada lo que denota que la activación del carbón obtenido a partir de las semillas de *datura stramonium* se realizó de manera efectiva. Debido que al observar la figura 1-4 se puede evidenciar la ausencia de esta longitud de onda, por lo que es indiscutible que hubo una reacción de activación química.

4.4 Adsorción de cromo con carbón activado

4.4.1 Análisis del diseño Experimental

Tabla 5-4 Resultado diseño experimental de acuerdo a las variables independientes R1.

Tratamiento	pH Inicial	Tiempo h	Masa carbón (g)	Concentración final de cromo (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/g)	% Adsorción
T1	3	1	0,05	5,255	0,745	12,42
T2	3	1	0,1	4,720	0,64	21,33
T3	3	3	0,05	4,987	1,013	16,88
T4	3	3	0,1	4,850	0,575	19,17
T5	5	1	0,05	5,094	0,906	15,1
T6	5	1	0,1	5,135	0,4325	14,42
T7	5	3	0,05	5,266	0,734	12,23
T8	5	3	0,1	4,985	0,5075	16,92
T9	4	2	0,075	5,113	0,5913	14,78

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 6-4 Resultado diseño experimental de acuerdo a las variables independientes R2.

Tratamiento	pH Inicial	Tiempo h	Masa carbón (g)	Concentración final de cromo (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/g)	% Adsorción
T1.2	3	1	0,05	5,122	0,818	14,63
T2.2	3	1	0,1	4,616	0,692	23,06
T3.2	3	3	0,05	5,150	0,85	14,17
T4.2	3	3	0,1	4,843	0,5785	19,28
T5.2	5	1	0,05	5,312	0,688	11,47
T6.2	5	1	0,1	4,972	0,514	17,13
T7.2	5	3	0,05	5,334	0,666	11,1
T8.2	5	3	0,1	4,904	0,548	18,27
T9.2	4	2	0,075	5,108	0,5946	14,87

Elaborado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

En la tabla 4-4 y 5-4 se presentan los resultados de la capacidad de adsorción, la eficiencia de adsorción en función del tiempo y la concentración final de la solución de cromo después del proceso de adsorción obteniendo así un rendimiento de adsorción mayor en el tratamiento 2 con un porcentaje de 21,33% y 23,06 % en su repetición, concluyendo como óptimo el tratamiento 2 siendo el que más se ajusta de acuerdo al carbón activado que se obtuvo.

4.4.2 Determinación de las isothermas de adsorción

- **Obtención de la curva de calibración.**

En la tabla 7-4 se muestran los resultados correspondientes a los valores de absorbancia obtenidos en el espectrofotómetro para cada una de las disoluciones preparadas.

Tabla 7-4 Datos de curva de calibración.

Nº muestra	Concentración (mg/L)	Absorbancia
1	0,2	0,120
2	0,4	0,321
3	1	0,748
4	1,5	1,127
5	2	1,514

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

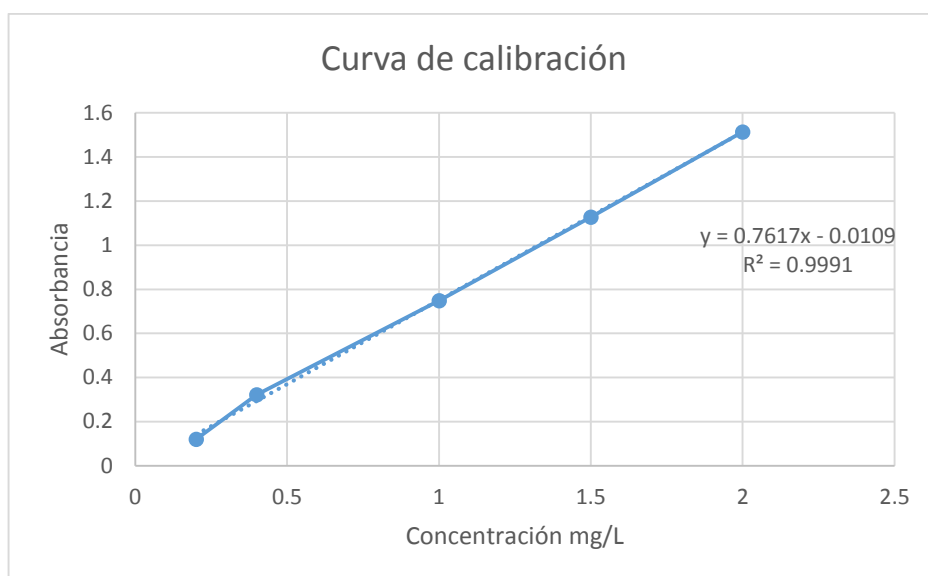


Figura 3-4 Curva de calibración.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

4.4.2.1 Isoterma Lineal

Tabla 8-4 Resultados de la matriz de isoterma de Lineal.

Muestra	Carga de carbón (g)	Volumen (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
1	0,1	0,05	2	1,588	0,000221
2	0,1	0,05	3	2,378	0,000311
3	0,1	0,05	4	3,161	0,0004195
4	0,1	0,05	5	3,954	0,000523
5	0,1	0,05	6	4,526	0,000737

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 9-4 Resultados de regresión de la isoterma Lineal.

Estadística de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,9701089
Coeficiente de determinación R^2	0,9411114
R^2 ajustado	0,9214819
Error típico	$5,6 \times 10^{-5}$
Observaciones	5

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 10-4 Análisis de varianza de la isoterma Lineal.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	$1,506 \times 10^{-7}$	$1,506 \times 10^{-7}$	47,9436	0,006175
Residuos	3	$9,427 \times 10^{-9}$	$3,1426 \times 10^{-9}$		
Total	4	$1,6 \times 10^{-7}$			
	Coeficientes	Error típico			
Intercepción	$-6,579 \times 10^{-5}$	$7,7544 \times 10^{-5}$			
Variable X1	0,00016309	$2,355 \times 10^{-5}$			

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Se puede apreciar en la tabla 8-4 que los datos experimentales al modelo Lineal da un coeficiente de correlación múltiple de 97,01%, este valor es cercano a la unidad y que tan solo 2,99% de los datos incrementan el error.

La ecuación lineal de regresión es la siguiente:

$$y = 0,0002x - 0,00007$$

Relacionando la ecuación 8-2 se obtiene los valores de la constante de adsorción:

K: -0,00007

Finalmente la isoterma Lineal viene dada por el siguiente modelo matemático:

$$y = -0,00007 * C_f$$

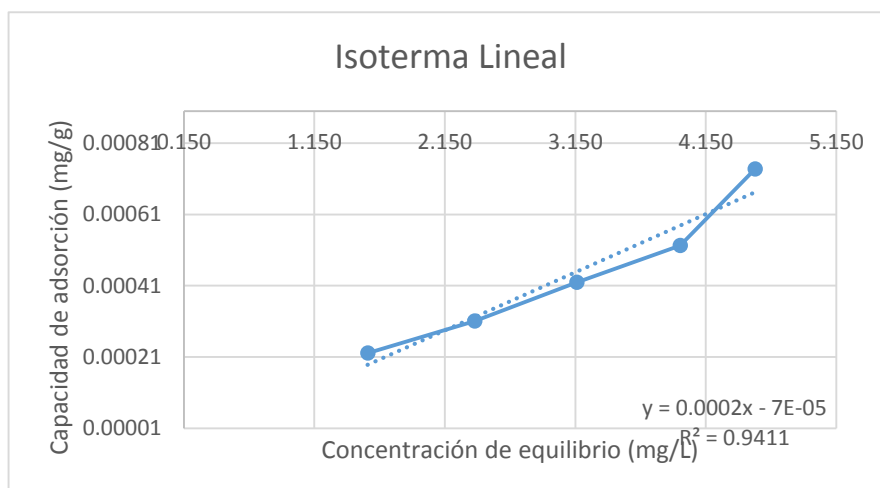


Figura 4-4 Isotherma de adsorción Lineal.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

4.4.2.2 Isoterma de Freundlich

Teniendo en cuenta la ecuación 5-3 mencionada anteriormente, se analiza los parámetros de la isoterma de Freundlich k y n aplicando logaritmo para representar $\ln q_e$ contra $\ln C_e$ obteniendo así:

Tabla 11-4 Resultados de la matriz de isoterma de Freundlich.

Muestra	Carga de carbón (g)	Volumen (L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\ln C_e$	$\ln q_e$	W Freundlich
1	0,1	0,05	1,588	0,000221	0,443	-8,417	$2,21 \times 10^{-4}$
2	0,1	0,05	2,378	0,000311	0,866	-8,0757	$3,11 \times 10^{-4}$
3	0,1	0,05	3,161	0,0004195	1,151	-7,776	$4,19 \times 10^{-4}$
4	0,1	0,05	3,954	0,000523	1,3747	-7,556	$5,23 \times 10^{-4}$
5	0,1	0,05	4,526	0,000737	1,5098	-7,2129	$7,37 \times 10^{-4}$

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 12-4 Resultados de regresión de la isoterma de Freundlich.

Estadística de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9823286
Coefficiente de determinación R^2	0,9649695
R^2 ajustado	0,9532927
Error típico	0,1003050
Observaciones	5

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 13-4 Análisis de varianza de la isoterma de Freundlich.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0,831446	0,831446	82,63966	0,002812
Residuos	3	0,030183	0,010061		
Total	4	0,861629			
	Coefficientes	Error típico			
Intercepción	-8,950920	0,133521			
Variable X1	1,069432	0,117641			

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

En la tabla 11-4 se puede evidenciar que los datos experimentales se ajustan al modelo de Freundlich con un coeficiente de correlación múltiple de 98,23% el cual es muy próximo a la unidad, indicándonos que un 1,77% de los datos no cumple con este modelo matemático.

La ecuación de regresión viene dada por:

$$y = 1,0694x - 8,9509$$

Realizando una comparación con la ecuación 5-3, se obtienen las constantes de la isoterma de Freundlich:

$$b: 1,296x10^{-4}$$

$$m: 1,0694$$

Finalmente la isoterma de Freundlich viene dada por el siguiente modelo matemático:

$$W = 1,296x10^{-4}C_f^{1,0694}$$

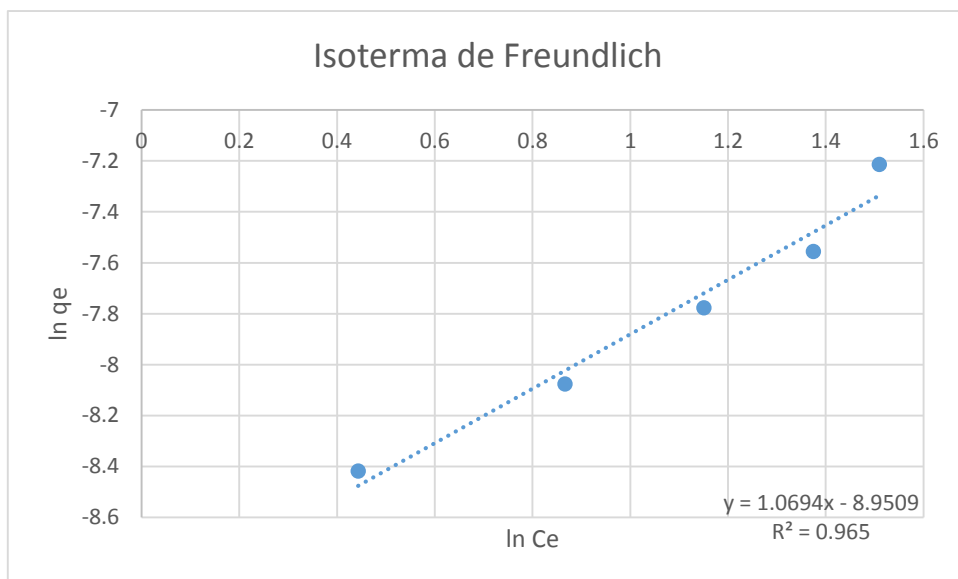


Figura 5-4. Isoterma linealizada del modelo de Freundlich.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Los resultados de equilibrio en base al modelo de Freundlich tuvieron un buen ajuste con valores del coeficiente de determinación R^2 de 0,953. De acuerdo a esto se obtuvo el parámetro de intensidad de adsorción de 1,0694 y la afinidad del adsorbente por el adsorbato de $1,296x10^{-4}$, los cuales nos demuestran enlaces muy débiles entre el carbón activado obtenido y los iones de Cr dándose una adsorción en multicapas, deduciendo esta adsorción como del tipo físico.

4.4.2.3 Isoterma de Langmuir

Teniendo en cuenta la ecuación 3-3 mencionada anteriormente, se analiza los parámetros de la isoterma de Langmuir k y b representando $\frac{1}{W}$ contra $\frac{1}{C_e}$ obteniendo así:

Tabla 14-4 Resultados de la matriz de isoterma de Langmuir.

Muestra	Carga de carbón (g)	Volumen (L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	W Langmuir
1	0,1	0,05	1,588	0,000221	0,641848	4524,88	$2,21 \times 10^{-4}$
2	0,1	0,05	2,378	0,000311	0,420521	3215,43	$3,11 \times 10^{-4}$
3	0,1	0,05	3,161	0,0004195	0,316355	2383,79	$4,20 \times 10^{-4}$
4	0,1	0,05	3,954	0,000523	0,252908	1912,04	$5,23 \times 10^{-4}$
5	0,1	0,05	4,526	0,000737	0,220945	1356,85	$7,37 \times 10^{-4}$

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 15-4 Resultados de regresión de la isoterma de Langmuir.

Estadística de la regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0,9909534
Coficiente de determinación R^2	0,9806848
R^2 ajustado	0,9742464
Error típico	198,47725
Observaciones	5

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Tabla 16-4 Análisis de varianza de la isoterma de Langmuir.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	6000321,92	6000321,92	152,3186	0,0011459
Residuos	3	118179,657	39393,2192		
Total	4	6118501,58			
	Coeficientes	Error típico			
Intercepción	5,235308	234,0924			
Variable X1	7215,254	589,6219			

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

En la tabla 14-4 se puede evidenciar los datos experimentales ajustados del modelo de Langmuir proporcionando un coeficiente de correlación múltiple de 99,09% el cual es muy cercano a la unidad, indicándonos que solo un 0,91% de los datos no cumple con este modelo matemático.

La ecuación de regresión viene dada por:

$$y = 7215,3x + 5,2353$$

$$b: 1,386x10^{-4}$$

$$k: 7,256x10^{-4}$$

Finalmente la isoterma de Langmuir viene dada por el siguiente modelo matemático:

$$W = \frac{1,386x10^{-4} * C_f}{1 - 7,256x10^{-4} * C_f}$$

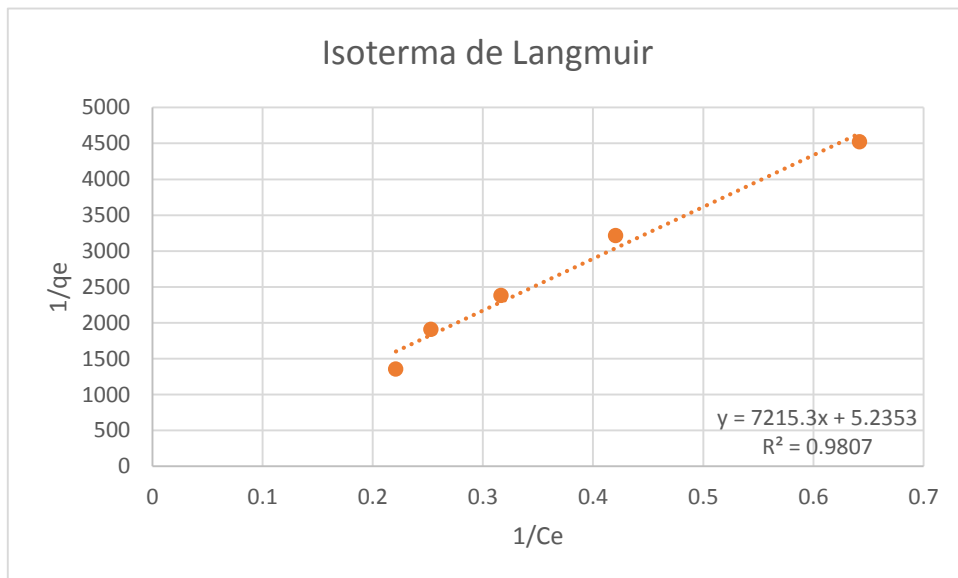


Figura 6-4. Isotherma linealizada del modelo de Langmuir.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

Los modelos de Langmuir y Freundlich se ajustaron a las isotermas de adsorción obtenidas de forma experimental presentando la forma de isoterma tipo L de una recta, el valor R^2 nos permite determinar el modelo que más se ajusta, en este caso la isoterma de Langmuir se ajusta más a nuestro caso de acuerdo al R^2 de 0,9807 la cual indica que se encuentra entre el rango de $(0 < RL < 1)$ determinando así una isoterma favorable y por ende indicándonos que la transferencia de masa desde el seno de la fase líquida hacia el sólido es factible.

- **Determinación de la curva de ruptura**

La curva de ruptura se la determinó variando la concentración del líquido, manteniéndose constantes los parámetros como su altura de lecho, el caudal de alimentación y el diámetro de las partículas de carbón. La concentración inicial de la solución de cromo es de 10 ppm, los resultados obtenidos se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 17-4 Determinación de la curva de ruptura.

Muestra	T (min)	C, ppm	C_f/C_o
1	8	5	0,163
2	16	5,64	0,186
3	24	6,1	0,227
4	32	6,7	0,347
5	40	7,89	0,388
6	48	8,1	0,438
7	56	9,1	0,497
8	64	11,6	0,623
9	72	14,5	0,792
10	80	15,1	0,837
11	88	16,75	0,928
12	96	17,2	0,95
13	104	17,5	0,978
14	112	17,7	0,986
15	120	17,9	0,998

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

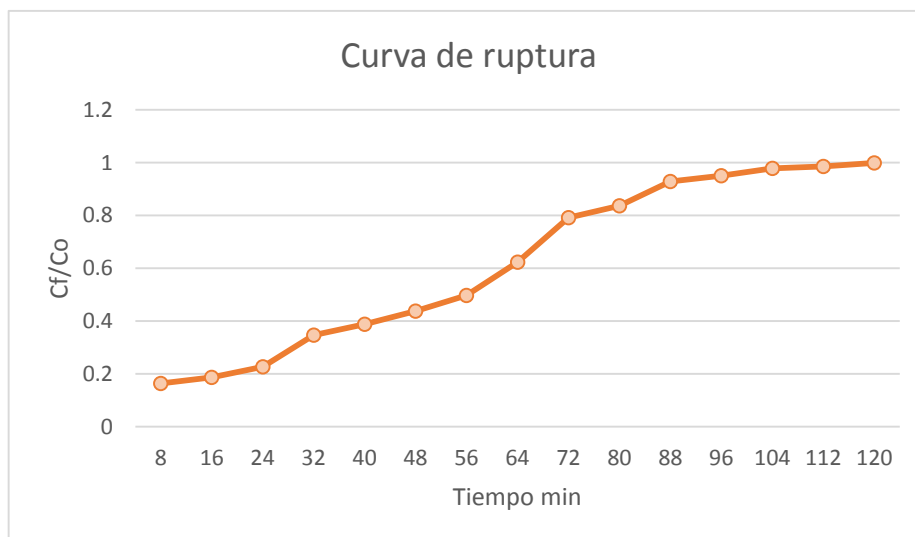


Figura 7-4. Obtención de la curva de ruptura.

Realizado por: Espinoza, Jhoe. 2021.

La curva de ruptura nos muestra datos aceptables durante el proceso de adsorción y funcionamiento del equipo, observamos que a los 120 minutos de operación, se obtiene un valor de 0.998, deduciendo que, con un incremento en la altura del lecho se obtendrá un aumento en el tiempo de ruptura así como en la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido, por el contrario disminuirá si el flujo volumétrico aumenta y por último, si se aumenta la concentración inicial de cromo, el tiempo de ruptura disminuye y la capacidad de adsorción aumenta.

CONCLUSIONES

- Se obtuvo carbón activado a partir de las semillas de *datura stramonium* para la remoción de cromo, mediante el estudio y preparación de las semillas, seguido de la carbonización a una temperatura de 400°C durante 1 hora en una atmosfera inerte mediante un reactor térmico con flujo de gas nitrógeno, y finalmente su posterior activación mediante la utilización de H₃PO₄ con una concentración del 85%.
- El carbón activado obtenido a partir de las semillas de *datura stramonium* mediante activación química cumple los requerimientos mínimos acorde a la norma NTE INEN 1991:1994 1995-10 como se muestra en la tabla 2-4 descrita anteriormente.
- La capacidad del carbón activado a partir de las semillas de *datura stramonium* en la adsorción de cromo obtenida en el presente trabajo presentó un bajo rendimiento en la adsorción de cromo en comparación a los diferentes carbones activados que existen en el mercado en base a las condiciones de operación y variables estipuladas, obteniéndose así una capacidad de adsorción del 0,64 mg Cr/g carbón activado, la cual corresponde a una eficiencia de adsorción del 30%.
- Se diseñó la columna de adsorción a escala de laboratorio en base a dos lechos fijos, cada una con una altura de 0,9896m, la cual fue determinada a un caudal de 15 L/min y tiempo de operación de 4 horas basándose en las condiciones del carbón activado obtenido de las semillas de *datura stramonium* para la remoción de cromo.
- Finalmente en la validación del proceso se concluye que el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos experimentales, es la isoterma de Langmuir con un coeficiente de correlación R² de 0,9807, el modelo matemático correspondiente es:

$$W = \frac{1,386 \times 10^{-4} * C_f}{1 - 7,256 \times 10^{-4} * C_f}$$

RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos de adsorción en soluciones con carbón activado a partir de las semillas de *datura stramonium*, a fin de cotejar los resultados con los obtenidos en este trabajo.
- Se recomienda determinar inmediatamente la concentración final del adsorbato, una vez realizado el experimento.
- Se recomienda evaluar la influencia de otras variables en la etapa de adsorción como la temperatura, pH, granulometría, etc.
- Se recomienda utilizar este tipo de carbón en la remoción de otros agentes para comparar su efectividad.

GLOSARIO

Adsorbente: superficie sobre la que sucede la adsorción (Vega, 2010).

Adsorbato: sustancia que se pega (adsorbe) en la superficie (Vega, 2010).

Adsorción: es un proceso de extracción de materia de una solución, conocido como adsorbato, concentrándose ésta sobre la superficie de una fase sólida, conocido como adsorbente (Pérez y Ventura, 2019, p.13).

Carbón: es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por carbono (SEVILLA, 2011, p.8).

Curvas de ruptura: es el movimiento progresivo de la zona de adsorción en una columna empacada (Avila, Puello y Castilla, 2019, p.36).

Espectrofotómetro: es un equipo que proporciona información relacionada con la intensidad de radiación en función de la longitud de onda o de la frecuencia (Skoog, Holler y Crouch, 2008, p.203).

Hidrofóbico: denota la tendencia, relativamente no polar de las moléculas de permanecer juntas en soluciones acuosas (Espinosa Silva, 2015, pp.1-9).

Isoterma de adsorción: es la relación general entre la cantidad de gas adsorbido por un sólido, a temperatura constante como función de la presión del gas (Vega, 2010).

Lecho fijo: técnica de adsorción en el que el material adsorbente se mantiene fijo, en el interior de la columna, hasta su completa saturación (Avila, Puello y Castilla, 2019, p.38).

Quimisorción: adsorción en la que las fuerzas de contacto que ligan las partículas del adsorbato a la superficie del adsorbente son de propiedad química en lugar de físicas (Avila, Puello y Castilla, 2019, p.39).

Poro: son espacios vacíos o huecos entre los microcristales que constituyen el carbón (Avila, Puello y Castilla, 2019, p.39).

Transferencia de masa: se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor (Cengel, 2007).

BIBLIOGRAFÍA

ACHURY CADENA, Carlos Alberto. *Obtención de Carbón Activado a partir de cascara de coco : obtención por medio de activación física y química.* 2008, pp. 36.

ALBIS ARRIETA, Alberto Ricardo, ORTIZ TORO, osé Daniel y MARTÍNEZ DE LA ROSA, Jader Enríque. *Remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando cáscara de yuca (Manihot esculenta): Experimentos en columna.* *Inge Cuc*, 2017. vol. 13, no. 1, pp. 42-52. ISSN 01226517. DOI 10.17981/ingecuc.13.1.2017.04.

AVILA, Ericson, PUELLO, Elder y CASTILLA, Pedro, Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de adsorción con dos columnas a escala de laboratorio (Trabajo de titulación). *E-Jurnal Manajemen Universitas Udayana* [en línea]. 2019. vol. 4, no. 3, pp. 1-21. ISSN 2302-8912. Disponible en: https://media.neliti.com/media/publications/112355-ID-pengaruh-struktur-aktiva-ukuran-perusaha.pdf%0Aacholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Funcionalidad+Familiar+en+Alumnos+de+1º+y+2º+grado+de+secundaria+de+la+institución+educativa+parroquial+“Pe q.

BARAZORDA, Katheryne y CONDORI, Edwin Lima, 2019. «*Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Oro con Carbón Activado Obtenido a partir de la Cáscara de Castaña*». (Trabajo de titulación). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú. 2019.

BOUTINAUD, Carolina María, 2016. *Diseño, Construcción y Puesa en Marcha de un Módulo de Adsorción con Drierita.* (Trabajo de titulación). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 2016.

CARRASCO TITO, Blanca Steffania y LONDA VELETANGA, Erika Gabriela, *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco “Cocos Nucifera L”.* (Trabajo de titulación), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2018. S.l.: s.n. ISBN 0105606081.

CASTELLÓ TORRE, Lirios, *Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa.* Universitat Politecnica de Valencia. 2017, pp. 65.

CASTIBLANCO MORENO, Yuly Tatiana y PERILLA PEREZ, Andryth Banezza, *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales provenientes de procesos de cromado de*

plasticos en empresas de Bogotá. Universidad Cooperativa de Colombia, [en línea], 2019. Disponible en: https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-Remocion_Cromo_Hexavalente.pdf.

CAVIEDES RUBIO, Diego Ivan, MUÑOZ CALDERÓN, Ramiro Adolfo, PERDOMO GUALTERO, Alexandra, RODRÍGUEZ ACOSTA, Daniel y SANDOVAL ROJAS, Ivan Javier, *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Ingeniería y Región*, 2015. vol. 13, no. 1, pp. 73. ISSN 1657-6985. DOI 10.25054/22161325.710.

CENGEL, Yunus A., *Transferencia de Calor y Masa. McGraw-Hill Interamericana*, 2007. vol. 18, no. 12, pp. 1419-1422. ISSN 01415492. DOI 10.1007/BF00129346.

ESPINOSA SILVA, Yanis, *Propiedades Termodinámicas del Efecto Hidrofóbico en la Estabilidad Proteica. Journal de Ciencia e Ingeniería*, 2015. vol. 7, no. 1, pp. 1-9. ISSN 2145-2628.

FONSECA, Rafael y GIRALDO, Liliana, *Adsorción de Cr(III) desde solución acuosa sobre carbones activados obtenidos de residuos de Zea mays. Afinidad*, 2015, vol. 71, no. 569, pp. 31-36. ISSN 2339-9686.

JUARES, Héctor Bañón, 2017. *Diseño de un Sistema de Adsorción en Carbón Activado Para La Eliminación De Cromo Hexavalente En Disolución Acuosa*. (Trabajo de titulación), Universitat Politecnica de Valencia. 2017, pp. 4-35.

LENNTECH, *Referencias tabla periódica*. [en línea]. [Consulta: 29 enero 2021]. 2019. Disponible en: https://www.lenntech.es/referencias_tabla-_periodica.htm.

LEYVA, Roberto, FLORES, José V., DÍAZ, Paola E. y BERBER, María S., *Adsorción de cromo (VI) en solución acuosa sobre fibra de carbón activado. Informacion Tecnologica*, 2008, vol. 19, no. 5, pp. 27-36. ISSN 07168756. DOI 10.1612/inf.tecnol.3902it.07.

LUNA, Donaciano, GONZÁLEZ, Armando, GORDON, Manuel y MARTÍN, Nancy, "Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco". Universidad Autonoma de México, 2007.

MOLINA, P., AGUILAR, N. y CORDOVEZ, P., Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos

sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 2010. vol. 8, no. 1, pp. 77-88.

MURGUEITIO, Erika, PINTO, Willian y LANDIVAR, José, Remoción De Cromo (Vi) a Partir De Agua Sintética a Nivel De Laboratorio, Mediante El Uso De Hidróxidos Dobles Laminares (Hdl). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2015. vol. 81, no. 2, pp. 160-170. ISSN 1810-634X. DOI 10.37761/rsqp.v81i2.26.

PATEL, Himanshu, *Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review*. *Applied Water Science*, 2019. vol. 9, no. 3. ISSN 2190-5487. DOI 10.1007/s13201-019-0927-7.

PÉREZ, Natalia y VENTURA, Nidia, Propuesta de diseño de un sistema de remoción de plomo en aguas, a nivel de laboratorio, utilizando estopa de coco (Cocos Nucifera) como medio adsorbente. *Journal of Chemical Information and Modeling* [en línea], 2019. vol. 53, no. 9, pp. 1689-1699. ISSN 1098-6596. Disponible en: <file:///C:/Users/User/Downloads/fvm939e.pdf>.

PLASTIGAMA, *Tuberías y Accesorios Tuberías y Accesorios*. 2018, no. 2.

RINCÓN-SILVA, Nelson, RAMIREZ-GOMEZ, Wandy, MOJICA-SÁNCHEZ, Lizeth, BLANCO-MARTÍNEZ, Diego, GIRALDO, Liliana y MORENO-PIRAJÁN, Juan, *Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H3PO4. Caracterización y evaluación de la capacidad de absorción de fenol desde solución acuosa*. *Ingeniería Y Competitividad*, 2013. vol. 16, no. 1, pp. 207-219. ISSN 0123-3033. DOI 10.25100/iyv.v16i1.3706.

SABIO, Molina y REINOSO, F. Rodríguez, *El CARBÓN ACTIVADO EN PROCESOS DE DESCONTAMINACIÓN*. [en línea], 1998. pp. 4. Disponible en: [http://www.elaguapotable.com/El carbon activo en procesos de descontaminacion.pdf](http://www.elaguapotable.com/El_carbon_activo_en_procesos_de_descontaminacion.pdf).

SEVILLA, U., *Manual Del Carbón Activo*. *Aula.Aguapedia.Org* [en línea], 2011. pp. 1-89. Disponible en: [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN ACTIVADO DEFINITIVO tar.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN_ACTIVADO_DEFINITIVO_tar.pdf).

SKOOG, D., HOLLER, F. y CROUCH, S., *Principios de análisis fundamental*. 2008 S.l.: s.n. ISBN 9786074813906.

TEGTMEYER, Dietrich y KLEBAN, Martín, "Investigación sobre cromo y cuero: un enfoque equilibrado de datos y hechos científicos" - *Lederpiel*. [en línea]. 2014 [Consulta: 29 enero 2021]. Disponible en: <http://lederpiel.com/investigacion-sobre-cromo-y-cuero/>.

TORSKE, Miguel, *La realidad de las aguas servidas en Ecuador – YAKUNINA*. [en línea]. 2019. [Consulta: 29 enero 2021]. Disponible en: <http://www.yakunina.com/la-realidad-de-las-aguas-servidas-en-ecuador/>.

TOVAR, Jenny Paola, *Remoción de Cadmio y Plomo en Agua con Carbón Activado Recubierto en Caucho de Polisulfuro*. 2016. vol. 147, no. March, pp. 11-40.

VEGA, L., *Fenómenos de superficie. Adsorción. Apuntes de fisicoquímica* [en línea], 2010. pp. 1-10. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf.



Firmado electrónicamente por:
**JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS**

ANEXOS

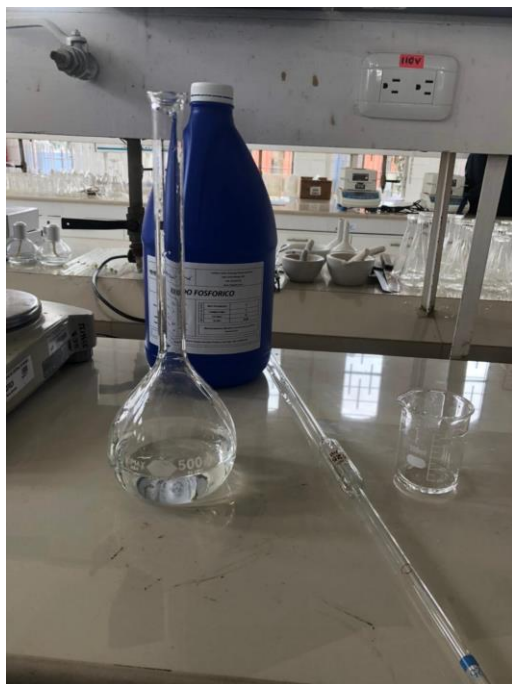
ANEXO A: Obtención Materia Prima



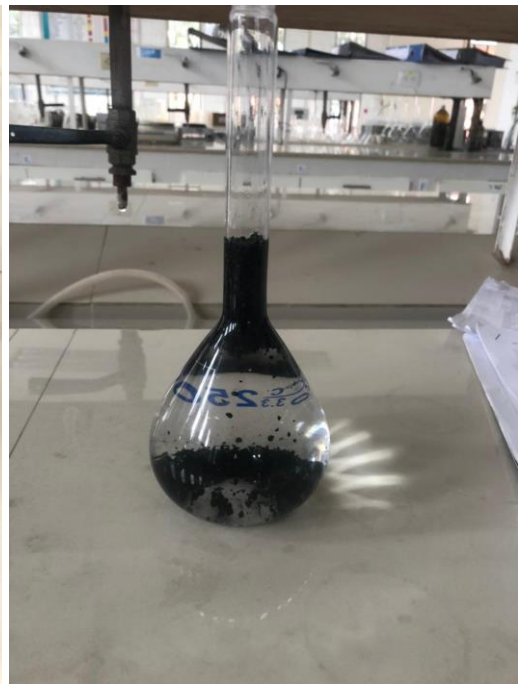
ANEXO B: Proceso de Carbonización



ANEXO C: Proceso de Activación Química



ANEXO D: Caracterización de la materia prima y carbón activado



ANEXO E: Ensayos de Adsorción





ANEXO F: Ficha técnica del Sistema de tuberías.

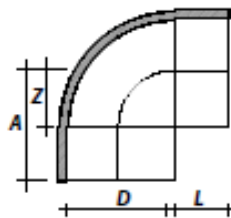
ESPECIFICACIONES PARA TUBERÍAS PVC (U)

Especificaciones para Tuberías con Unión por sellado elastomérico (UZ) y Unión por cemento solvente (EC) para riego.

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior	Espesor Nominal	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNIÓN E/C			mm	MPa	PSI (lb/pulg ²)
	20	17.8	1.1	1.25	181	12.75
		16.8	1.6	2.00	290	20.40
	25	22.8	1.1	1.00	145	10.20
		21.8	1.6	1.60	232	16.32
	32	29.8	1.1	0.80	116	8.16
		28.8	1.6	1.25	181	12.75
	40	37.8	1.1	0.63	91	6.43
		36.8	1.6	1.00	145	10.20
		36.0	2.0	1.25	181	12.75
50		47.4	1.3	0.63	91	6.43
		46.8	1.6	0.80	116	8.16
		46.0	2.0	1.00	145	10.20
		45.0	2.5	1.25	181	12.75
63		59.8	1.6	0.63	91	6.43
		58.8	2.1	0.80	116	8.16
		58.0	2.5	1.00	145	10.20
		56.8	3.1	1.25	181	12.75
75		72.0	1.5	0.50	73	5.10
		71.2	1.9	0.63	91	6.43
		70.2	2.4	0.80	116	8.16
		69.0	3.0	1.00	145	10.20
		67.6	3.7	1.25	181	12.75
90		86.4	1.8	0.50	73	5.10
		85.4	2.3	0.63	91	6.43
		84.2	2.9	0.80	116	8.16
		82.8	3.6	1.00	145	10.20
		81.2	4.4	1.25	181	12.75
110		105.6	2.2	0.50	73	5.10
		104.6	2.7	0.63	91	6.43
		103.2	3.4	0.80	116	8.16
		101.6	4.2	1.00	145	10.20
		99.6	5.2	1.25	181	12.75
140		134.4	2.8	0.50	73	5.10
		133.2	3.4	0.63	91	6.43
		131.4	4.3	0.80	116	8.16

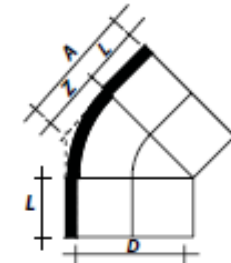
Accesorios Unión por Cementado Solvente (E/C) Inyectados de PVC (1 MPa)

CODO E/C x 90°



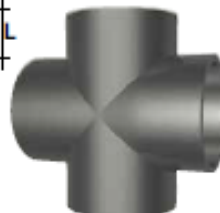
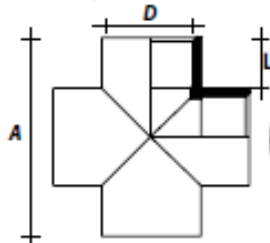
CÓD	DIÁMETRO	A (mm)	L (mm)	Z (mm)
924985	20 mm	27	16	11
924981	25 mm	32	19	14
924903	32 mm	39	22	17
924905	40 mm	47	26	21
924952	50 mm	57	31	26
924921	63 mm	70	38	33
924914	75 mm	85	44	39
924918	90 mm	97	51	46
924979	110 mm	105	58	54
924887	125 mm	117	61	56
924889	140 mm	150	128	56
924891	160 mm	178	180	81
924894	200 mm	207	220	101
924898	225 mm	235	245	115
924899	250 mm	265	281	130

CODO E/C x 45°



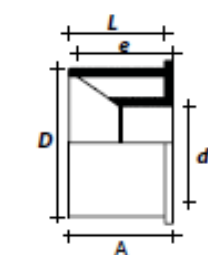
CÓD	DIÁMETRO	A (mm)	L (mm)	Z (mm)
924895	20 mm	21	16	5
924986	25 mm	25	19	6
926686	32 mm	30	22	8
924904	40 mm	36	26	10
924908	50 mm	43	31	12
924912	63 mm	52	38	14
924913	75 mm	78	44	34
924917	90 mm	71	51	20
924983	110 mm	85	61	24
924886	125 mm	85	61	24
924888	140 mm	120	86	34
924890	160 mm	120	86	34
924893	200 mm	149	106	43
924897	225 mm	196	106	90

CRUZ E/C



CÓD	DIÁMETRO	A (mm)	L (mm)
925117	25 mm	65	19
925118	32 mm	80	22
925113	40 mm	96	26
925119	50 mm	116	31
925120	63 mm	143	38
925121	90 mm	197	51
925116	110 mm	238	61

REDUCTOR BUJE E/C



CÓD.	DIÁMETRO D	A (mm)	L (mm)	e (mm)
924643	25 A 20 mm	19	19	19
924729	32 A 25 mm	29	22	19
924653	40 A 32 mm			
924608	50 A 40 mm	36	32	25
924609	63 A 50 mm	44	44	31
924644	75 A 50 mm	44	44	31
924645	75 A 63 mm	44	44	31
924646	90 A 63 mm	51	51	44
924647	90 A 75 mm	51	51	44
924634	110 A 90 mm	61	61	51
924635	125 A 110 mm	61	61	51
924636	140 A 110 mm	216	86	61
924637	140 A 125 mm	216	86	61
924638	160 A 110 mm	216	86	61
924639	160 A 125 mm	216	86	61
924640	160 A 140 mm	216	86	61
924651	200 A 160 mm	242	106	86

ANEXO G: Ficha técnica de la Bomba.



Bombas de agua eléctricas

SKU: 21314.

BOMBA "PAOLO" PBP50 1/2 HP

- * Motor con eje de acero inoxidable.
- * Sello mecánico de anillo de cerámica y sello de grafito.
- * Impeler de aletas radiales, fabricado en aleación de bronce.
- * Protector térmico incorporado.
- * Menor consumo eléctrico.
- * Motor silencioso.
- * Succión y descarga de 1" NPT.

Especificación

Marca	PAOLO
Aplicaciones	* Tanques de reserva. * Jardines de riego. * Insuficiencia de presión. * Sanitarias.
Modelo de fábrica	PKM-60
Máxima potencia HP	1/2
Tensión V	115/230
Ciclos hz/rpm	60/3450



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA
INVESTIGACIÓN**



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 25/ 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres – Apellidos: JHOE ALEXANDER ESPINOZA BARRIONUEVO

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: CIENCIAS

Carrera: INGENIERÍA QUÍMICA

Título a optar: INGENIERO QUÍMICO

f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. CPA. Jhonatan Rodrigo Parreño Uquillas. MBA.



Pirmado electrónicamente por:
**JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS**



25-10-2021
1377-DBRAI-UTP-2021